



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ZPRACOVÁNÍ DAT Z TERMOKAMERY

IR CAMERA DATA PROCESSING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DALIBOR MALÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV RICHTER, Ph.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Dalibor Malík

Ročník: 2

ID: 106612

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování dat z termokamery

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte systém, který umožní zpětnou projekci informace získané termokamerou do měřené scény. Navrhněte vzorové scény, pro které je možné systém použít. Navrhněte možné složení pracoviště pro různé aplikace a pro zvolenou aplikaci pracoviště realizujte. Implementujte a odlaďte základní moduly aplikací a propojte je do funkčního celku. Demonstrujte zobrazování různých typů informací (aktuální, časový průběh, difference, maximum...). Dosažené výsledky zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

SONKA M., HLAVAC V., BOYLE R.: Image Processing, Analysis and Machine Vision. 3rd edition. Toronto : Thomson, 2008. 829 s. ISBN 978-0-495-08252-1.

Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P.: Moderní počítačová grafika, Computer Press, 1998, ISBN 80-251-0454-0

KRAUS K.: Photogrammetrie 1 und 2, Ummeler / Bonn, 1996, ISBN: 3110177080

MAŘÍK V.: Umělá inteligence , Praha: Academia, 2001, ISBN: 80-200-0472-6

Faugeras O.: Three-Dimensional Computer Vision, The MIT Press 1993

Termín zadání: 6. 2. 2012

Termín odevzdání: 21. 5. 2012

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá měřením termokamerou s minimalizací chyb během měření. Vysvětluje základní pojmy v oblasti termografie a je popsána realizace zpracování dat z termokamery se zpětnou projekcí graficky upraveného termogramu do měřené scény. S daným souvisí návrh scény, kalibrace termokamery s projekčním zařízením, rektifikace obrazu, možnosti zpracování termogramu pro vyzdvížení zajímavých informací a realizace ovládání v podobě uživatelského rozhraní. Dosažené výsledky jsou analyzovány a zpětně vyhodnocovány.

Klíčová slova

termografie, termokamera, termogram, projektor, kalibrace, rektifikace, scéna, pyrometrie, IR spektrum

Abstract

The aim of this master's thesis is to give information about the thermo camera measurement with error minimization. The basic concepts of thermography are explained with an implementation of postprocessing technique which uses graphically modified thermogram back projected to the scene. This is closely related to the scene design, calibration of thermal camera with projector, image rectification, thermogram processing with highlighting of interesting information and implementation of control elements as the user interface. The results obtained are analyzed and re-evaluated.

Keywords

thermography, thermal camera, thermogram, projector, calibration, rectification, scene, pyrometry, IR spectrum

Bibliografická citace:

MALÍK, D. *Zpracování dat z termokamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 66s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Zpracování dat z termokamery jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miloslavu Richterovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teplota	12
2.1	Bezdotykové měření teploty	12
2.1.1	Bolometry	13
2.2	Pyrometrie	14
2.2.1	Výhody/nevýhody termovizního měření	16
2.2.2	Vlastnosti materiálů (emisivita, reflexivita)	17
3	Termografie	19
3.1	Termogram.....	19
3.2	Využití termografie v praxi.....	21
4	Návrh měřicího pracoviště.....	24
4.1	Termovizní kamera Guide EasIR – 4.....	25
4.1.1	Komunikační rozhraní termovizní kamery	26
4.2	Realizace pracoviště.....	27
4.3	Kalibrace termovizní kamery s projekčním zařízením	28
4.4	Rektifikace	31
4.4.1	Realizace rektifikace	33
4.5	Volba scény	34
5	Realizace a zpracování měření	36
5.1	Popis aplikace.....	36
5.1.1	Řešené problémy.....	37
5.2	Aplikační cyklus.....	38
5.2.1	Popis vývojového algoritmu GUI.....	41
5.2.2	Popis vývojového algoritmu přerušení	43
5.3	Funkce třídy thermocamera.....	43
5.3.1	Kalibrace termokamery.....	45
5.3.2	Kalibrace projekčního zařízení	46
5.3.3	Transformace obrazu	47
5.3.4	Segmentace teplotních značek	48
5.3.5	Zpracování obrazu	49
6	Uživatelské rozhraní (GUI)	53
6.1	Popis prvků GUI	53
6.2	Shrnutí funkce	56
7	Analýza měření	57
7.1	Tepelné otisky	57
7.2	Vliv projekčního zařízení na měřený objekt – scénu	59

7.3	Realizovaná měření scény se zpětnou projekcí.....	61
8	Závěr	66

Seznam obrázků

Obr. 1: Provedení bolometru [11].....	13
Obr. 2: Provedení mikrobolometru [11]	14
Obr. 3: Rozdělení elektromagnetického spektra [18]	14
Obr. 4: Teplotní závislost vyzařování absolutně černého tělesa [18]	15
Obr. 5: Barevné palety (<i>a - Rainbow, b - Hot/Cold, c - Iron, d - Gray</i>)	20
Obr. 6: Termografie ve stavebnictví, zateplený/nezateplený panelový dům [16]	21
Obr. 7: Termografie v průmyslu, detekce přechodových jevů [16].....	22
Obr. 8: Termografie ve zdravotnictví, detekce kožních/podkožních viróz [16].....	22
Obr. 9: Termografie ve vědě a výzkumu, rozložení teplot na DPS [16]	23
Obr. 10: Rozložení teplot na notebooku	24
Obr. 11: Termovizní kamera EasIR-4 [1]	25
Obr. 12: Realizace měřicího systému	27
Obr. 13: Měřicí pracoviště	28
Obr. 14: Led kalibrační značka, vzdálenost 1m a 3m.....	29
Obr. 15: Výkonová led dioda, LUXEON K2 [7].....	30
Obr. 16: Kalibrační deska	31
Obr. 17: Rektifikace obrazu do jiné roviny	32
Obr. 18: Obraz před rektifikací.....	33
Obr. 19: Rektifikace zvolené oblasti.....	33
Obr. 20: Teplotní značky a paleta v termogramu	37
Obr. 21: Palety jednotlivých typů převedeny do šedotónového modelu	38
Obr. 22: Vývojový diagram uživatelského rozhraní.....	39
Obr. 23: Vývojový diagram zpracování termogramu	40
Obr. 24: Skrytí teplotních značek při kalibraci.....	45
Obr. 25: Testovací obraz kalibračních značek a jejich vyhledání	46
Obr. 26: Měření zkreslení objektivu	47
Obr. 27: Vzory hledané v obraze	48
Obr. 28: Detekce značky s teplotním údajem	49
Obr. 29: Vyhledání a zvýraznění diferencí	50
Obr. 30: Vyhledání max/min a zobrazení teploty v bodě	51
Obr. 31: Vyhledání a zvýraznění teplot nad zvolenou mezí.....	52
Obr. 32: Uživatelské rozhraní	54
Obr. 33: Výběr typu zpracování	54
Obr. 34: Nastavení diferencí	55
Obr. 35: Nabídka maximum/minimum.....	55
Obr. 36: Nastavení zobrazení oblastí nad mezní teplotou	55
Obr. 37: Teplotní rozsah termovizní kamery	57

Obr. 38: Tepelné otisky	58
Obr. 39: Závislost maximální teploty na čase.....	59
Obr. 40: Závislost minimální teploty na čase	60
Obr. 41: Závislost průměrné teploty na čase	60
Obr. 42: Měřená scéna uložena z GUI (měření vlivu projektoru)	62
Obr. 43: Zvýraznění teplot nad zadanou mezí.....	63
Obr. 44: Zvýraznění teplot nad mezní + smíšení, notebook bez podložky	63
Obr. 45: Zobrazení diferencí.....	64
Obr. 46: Zobrazení teploty ve vybraném bodě	64
Obr. 47: Zobrazení max/min v základním termogramu	65
Obr. 48: Scéna s kalibrační deskou.....	72
Obr. 49: Uložený snímek z GUI, ruka	72
Obr. 50: Zvýraznění teplot nad mezí + GUI, notebook deska.....	73
Obr. 51: Diference, notebook bez podložky	73
Obr. 52: Zvýraznění teplot nad mezí + smíšení + GUI, notebook klávesnice.....	74
Obr. 53: Zvýraznění teplot nad mezí + odstranění značek, ruka	74
Obr. 54: Zvýraznění teplot nad mezí + smíšení + odstranění značek, ruka.....	75

1 ÚVOD

Termografie neboli měření plošné teploty se v dnešní době rozvíjí ve stále více oborech jako je strojírenství, elektrotechnika, energetika, zdravotnictví, věda, záchranná práce, vojenský průmysl a v mnoha dalších. Aplikace využívající termografii mohou vést od rozsáhlých měření budov pro analýzu tepelných úniků, až k vysoce specifickým měřením pouhých oblastí na lidském těle. Samotná práce je zaměřena na realizaci měřicího systému v oblasti vědy, výzkumu a medicíny, kde hraje významnou roli detekce a analýza dat v reálném čase.

S prudkým rozvojem termografie je vhodné se zabývat zdokonalením měřících technik a díky počítačové technice také analýzou měřených dat za účelem grafického zviditelnění jinak těžce postřehnutelných informací. Matematické aparáty a modely odhalí i sebemenší nesrovnalosti v termogramech a vedou k jejich pravděpodobnější detekci. V daném odvětví dochází ke spojení prvků počítačového vidění a počítačové grafiky. Počítačové vidění ve smyslu detekce významných oblastí (významných informačních prvků) a počítačová grafika reprezentována smysluplným grafickým znázorněním získaných informací. Vzájemnou kombinací lze vytvořit silný detekční a rozpoznávací aparát.

V této práci jsou popisovány základní principy měření termovizní kamerou, možnosti použití, osvětluje terminologii využívanou v termografii a v neposlední řadě se zabývá realizací měřicího pracoviště se zpětnou projekcí termogramu do měřené scény. Značnou část je vhodné věnovat samotnému měření. Data ztracená při pořizování záznamu jsou neobnovitelná, také proto v tomto kroku dochází většinou k nejvýznamnějšímu pochybení, minimálně k nejvýznamnějšímu pochybení bez možnosti obnovy. Správné pochopení funkce termokamery a všech vlivů ovlivňující měření je tedy základem. V návrhu měřicího pracoviště je zabýváno se vhodným typem scény, rozmístěním snímacího a projekčního zařízení vzhledem ke scéně a vlivy zapříčínujících vznik chyb při měření v IR spektru. S rozmístěním zařízení vznikají hned dva problémy. Prvním je potřeba transformovat obraz z roviny měřicího zařízení do roviny projekčního zařízení, protože snímací a projekční část nelze realizovat z jednoho bodu. Druhým je vzájemná kalibrace obou zařízení. Zohledněno je více postupů, které jsou doprovázeny rozбором a výběrem vhodné metody.

Získaná naměřená data jsou dále podrobena analýze a upravována za účelem zviditelnění důležitých informací. Projekční zařízení je samo o sobě zdroj tepelného záření a je potřeba analyzovat jeho vliv na měření. Výsledkem práce je realizace měřicího pracoviště se zpětnou projekcí teplotního rozložení na měřený objekt a vytvoření aplikace k ovládání celého systému a následné analýze dat.

2 TEPLOTA

[4], [8], [17]

Teplota je stavová veličina charakterizující stav hmoty a ovlivňující nespočet vlastností materiálů. Jedná se o veličinu popisující, zda při tepelném kontaktu látky s jinou látkou bude/nebude tato látka v tepelné rovnováze neboli zda se bude přijímat nebo předávat teplo. Teplota nelze měřit přímým způsobem, proto se využívá metod nepřímého měření, tedy převodu teploty na jinou fyzikální veličinu analyzovatelnou elektrickým signálem.

K měření teploty se používají teplotní stupnice. Základní teplotní stupnicí je termodynamická teplotní stupnice T s počátkem v absolutní nule (převáděno na stupně celsia $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$) a jednotkou značenou kelvin K . Kelvin je základní jednotkou soustavy SI. V praxi se často setkáváme s dalšími stupnicemi t například: Celsiovou stupnicí ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheitovou stupnicí ($^{\circ}\text{F}$).

2.1 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření je rychlý, jednoduchý a přesný způsob měření teploty. Je celá řada způsobů měření závislých na použitém detektoru, optice, způsobu převedení teploty na měřený elektrický signál, teplotním rozsahu anebo způsobu prezentace naměřené veličiny. Základní dělení bezdotykového měření teploty je na tepelné a kvantové senzory.

a) Dotykové:

- Elektrické (odporové polovodičové/kovové)
- Dilatační (kapalinové, plynové)
- Speciální (akustické, šumové, magnetické)

b) Bezdotykové:

- Tepelné
 - Bolometrické
 - Termoelektrické
 - Pyrometrické
- Kvantové
 - Fotodiody
 - Fotorezistory

V případě termovizních kamer nás zajímají pouze bezdotykové tepelné senzory nazývané se bolometry. Jedná se o nejvíce využívané IR senzory v oblasti termografie, přesněji v případě termovizních kamer se jedná o mikrobolometry. Bolometry pracují

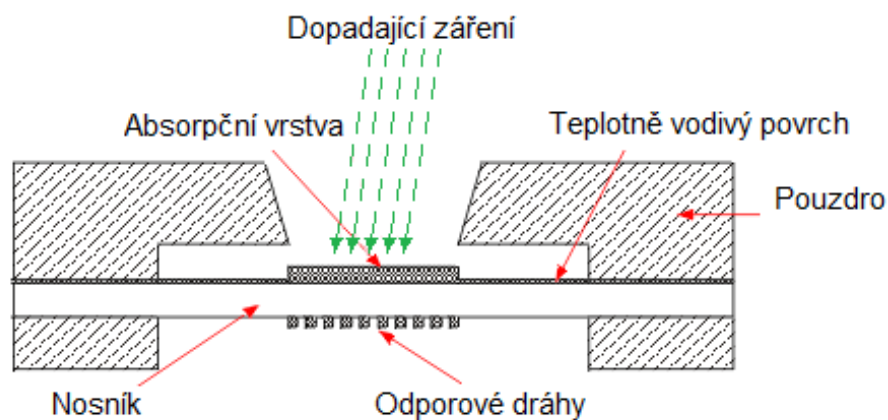
na principu pyrometrie, tedy měří celkový vyzářený tepelný výkon prostřednictvím infračerveného záření. Každé těleso o vyšší povrchové teplotě, než je hodnota absolutní nuly, vysílá elektromagnetické záření úměrné jeho teplotě. Tohoto jevu, nazývaného Planckův zákon, využívají všechny senzory v pyrometrii.

2.1.1 Bolometry

[11]

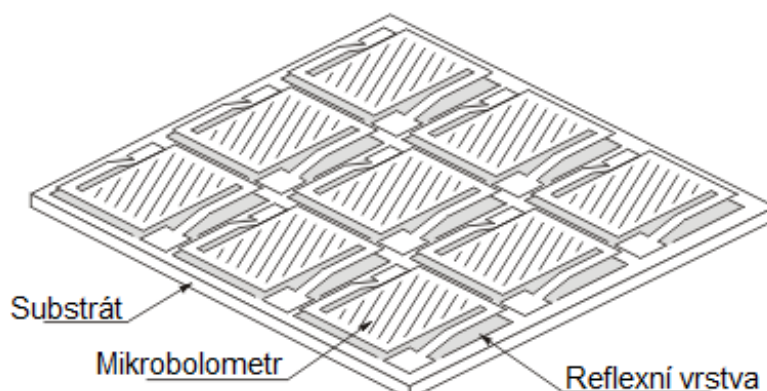
Bolometry pracují na obdobném principu jako kovové odporové senzory. Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na množství absorbovaného dopadajícího infračerveného záření. Množství dopadajícího IR záření je přímo úměrné teplotě, a je tedy možné ji určit ze změn elektrického odporu bolometru. Z hlediska měření nezatíženého chybami je potřeba senzor teplotně izolovat od svého okolí. [8], [4]

Konstrukční provedení bolometru je na obr. 1. Dopadající záření je pohlcováno absorpční vrstvou tvořenou zlatou fólií. Dochází k pohlcení až 95% záření a ohřátí teplotně vodivého povrchu včetně nosníku. Na spodní straně nosníku je napařena odporová vrstva měnící lineárně odpor dle ohřevu způsobeného IR zářením. Využívá se odporových materiálů s velkým teplotním koeficientem a malou časovou konstantou pro měření rychlých teplotních změn.



Obr. 1: Provedení bolometru [11]

V termovizních kamerách se využívá struktura mikrobolometrového pole. Jedná se o větší množství bolometrů na jednom senzoru vytvářející obdélníkovou (čtvercovou) strukturu – 2D pole. Dané maticové uspořádání reprezentuje množství pixelů ve výsledném termografickém snímku. Běžná velikost matice bývá u levnějších termovizních kamer 160x120 pixelů (elementů na senzoru), dražší přístroje dosahují daleko vyššího počtu 640x480 elementů a špičkové laboratorní termovizní kamery až 1024x1024 elementů, které umožňují daleko kvalitnější měření. Běžná maticová struktura mikrobolometrů využívaných v termovizních kamerách je zobrazena na obr. 2.

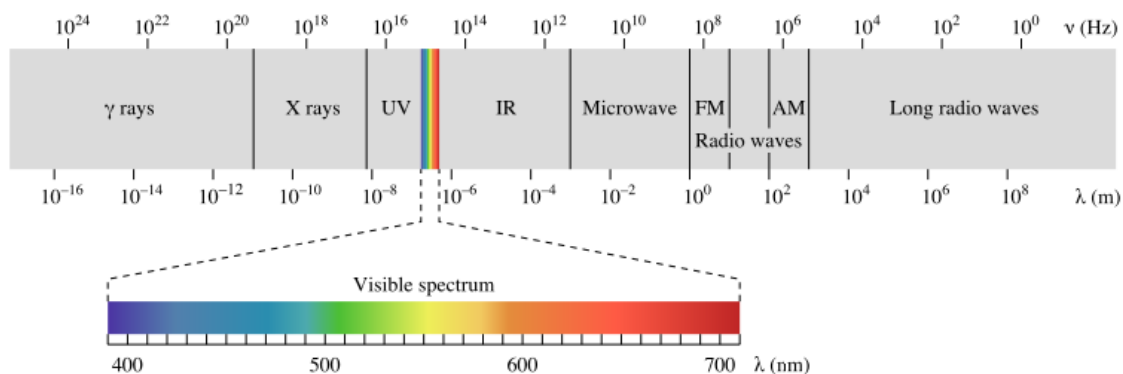


Obr. 2: Provedení mikrobolometru [11]

2.2 Pyrometrie

[12], [15]

Jak již bylo zmíněno, jedná se o bezkontaktní měření teploty na základě detekce elektromagnetického záření v infračerveném spektru nebo v mírném jeho okolí. Detekované záření bývá v rozmezí vlnových délek (λ) od $0,4\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$, přičemž do hodnoty $0,78\mu\text{m}$ se jedná o viditelné spektrum. Pokud převedeme vlnové délky na jim odpovídající teploty, dostaneme přibližný teplotní rozsah od -40°C do $10\,000^\circ\text{C}$.



Obr. 3: Rozdělení elektromagnetického spektra [18]

V zásadě v oblasti viditelného spektra a v oblasti blízké infračerveného spektra (do $3\mu\text{m}$) nedochází k detekci teplot z důvodů rušení aplikacemi pracujícími například s infračerveným přenosem dat. K detekci běžných teplot se využívá pásem 3 až $5\mu\text{m}$ nebo 8 až $14\mu\text{m}$, takzvaných atmosférických oken.

S termografií se pojí hned několik fyzikálních zákonů, bez jejichž znalosti se správné a přesné měření neobejde. Jedná se o Planckův zákon, Stefan-Boltzmannův zákon, Lambertův zákon a Wienův posunovací zákon. Zákony jsou referovány ve vztahu k absolutně černému tělesu.

Planckův zákon vyjadřuje závislost intenzity záření I absolutně černého tělesa na vlnové délce a termodynamické teplotě. Z daného tvrzení vychází poznatek, kdy

každé těleso o povrchové teplotě, vyšší jak absolutní nula, vysílá elektromagnetické záření o vlnové délce odpovídající jeho teplotě.

$$I_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} \right)} \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1)$$

I – intenzita záření

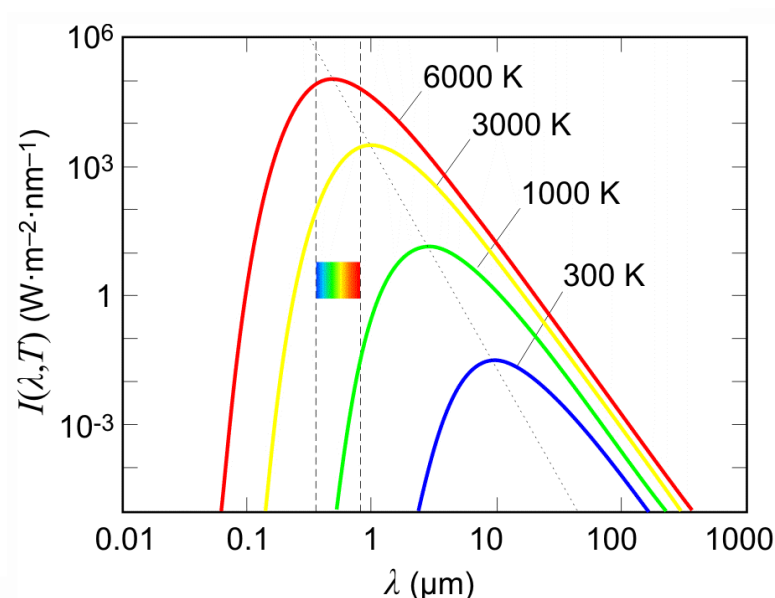
h – redukovaná Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$)

c – rychlost světla ve vakuu ($c = 2,998 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$)

λ – vlnová délka (m)

T – teplota absolutně černého tělesa (K)

k – Boltzmannova konstanta ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)



Obr. 4: Teplotní závislost vyzařování absolutně černého tělesa [18]

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje růst intenzity vyzařování tělesa se čtvrtou mocninou termodynamické teploty daného tělesa. Zákon platí, jak již bylo řečeno, pro absolutně černé těleso. V reálných podmínkách se s takovým tělesem nesetkáme, a proto je potřeba vztah doplnit o emisivitu ε daného tělesa.

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2)$$

I – intenzita záření

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$)

T – termodynamická teplota (K)

ε – emisivita tělesa

Lambertův zákon popisuje pokles intenzity záření tělesa s rostoucím úhlem odchýlení od normály vyzařování. Jednodušeji řečeno, maximum elektromagnetického záření leží ve směru normály k ploše zdroje záření.

$$I_{\varphi} = I_N \cdot \cos(\varphi) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

I_{φ} – intenzita záření ve směru odchýleném od normály zdroje

I_N – intenzita záření v kolmém směru ke zdroji ($W \cdot m^{-2}$)

φ – úhel odklonění od normály ($^{\circ}$)

Wienův posunovací zákon vyjadřuje změnu vlnové délky, na které je vyzařovaná energie absolutně černého tělesa maximální v závislosti na změně termodynamické teploty. S rostoucí termodynamickou teplotou se vlnová délka snižuje, tzn. čím teplejší je dané těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách, viz obr. 4.

$$\lambda_{MAX} = \frac{b}{T} \quad [m] \quad (4)$$

λ_{MAX} – vlnová délka maxima vyzařování

T – termodynamická teplota tělesa (K)

b – Wienova konstanta ($b = 2,898mm \cdot K$)

Změna intenzity záření se vzdáleností vyjadřuje snížení přijaté intenzity záření emitovaného bodovým zdrojem se čtvercem vzdálenosti od tohoto zdroje. Popis platí pro ideální případ, kdy se jedná o bodový zdroj a vyzařuje světlo izotropně.

$$I = \frac{I_0}{4\pi r^2} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

I – přijatá intenzita záření

I_0 – intenzita zdroje záření

r – vzdálenost od zdroje

2.2.1 Výhody/nevýhody termovizního měření

Termovizní měření sebou přináší řadu výhod, ale také jisté nevýhody, které nelze při samotném měření zanedbávat. Hlavní nevýhody bývají způsobeny neznalostí výše zmíněných zákonů a lze se jich alespoň částečně vyvarovat [8]

Výhody:

- Zanedbatelný vliv měřicího přístroje na měřený objekt
- Nedochozí k mechanickému opotřebení snímaného objektu
- Možnost měření pohybujících se částí
- Možnost měření rychlých teplotních změn
- Lze detekovat a analyzovat celé povrchy těles

Nevýhody:

- Nejistota měření z důvodu nepřesného stanovení emisivity
- Nejistota vzniklá tepelnými odrazy
- Nejistota způsobená neznalostí správné hodnoty propustností prostředí
- Nejistota měření špatným zaměřením měřeného objektu

2.2.2 Vlastnosti materiálů (emisivita, reflexivita)

[4], [6], [5], [12]

Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Jedná se o bezrozměrnou veličinu určující schopnost tělesa vyzařovat teplo. Emisivita absolutně černého tělesa je rovna $\varepsilon = 1$, reálné předměty mají emisivitu vždy menší. Obecně není konstantní pro určitý povrch, ale je závislá na parametrech jako teplota objektu, barva povrchu, struktura povrchu, vlnová délka a podobně. Tělesa, která mají emisivitu menší jak jedna, se nazývají šedé zářiče. Naopak ne-šedými zářiči (non gray) bývají označována tělesa, která mají emisivitu závislou na vlnové délce a teplotě. Celkové množství vyzářené energie měřeného objektu se skládá z emitovaného záření (ε emisivita), odraženého záření (ρ reflexivita) a procházejícího záření (τ transmisivita). Transmisivitu u pevných materiálů lze považovat za nulovou, protože záření v infračerveném pásmu pevnými materiály neprochází. Pro emisivitu tedy platí vztah:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (6)$$

Vyloučení transmisivity získáme:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (7)$$

Ze vztahu vyplývá vysoká emisivita pro materiály s nelesklým povrchem, jako je například dřevo nebo plasty. Naopak materiály s lesklým povrchem (leštěné kovy) mají velmi nízkou emisivitu.

Chyby vzniklé tepelnými odrazy byly z části zmíněny u emisivity vztahem (7), kde jsou vystiženy parametrem ρ . Kromě vyzářené energie daného materiálu dochází také k měření okolního záření včetně reflexe. Stejně jako u emisivity také reflexe je dána vlastnostmi materiálu například teplotou, typem povrchu, barvou a úhlem odklonu snímáče od normály povrchu.

Do kvalitních termokamer se před samotným měřením zadává faktor emisivity a teplotní odrazy v měřeném prostředí. Reflexi si termokamera dopočítává sama z výše uvedeného vzorce (7). Stanovení emisivity měřeného objektu může být provedeno několika metodami.

Měření emisivity materiálu:

1) Vyhledání emisivity materiálů pomocí tabulek

Asi nejjednodušší metodou je využití tabulek s často používanými materiály. V tomto případě je potřeba brát hodnoty pouze jako orientační, zvláště pak u kovů. Různé vady na povrchu materiálů (oxidace, zvlnění povrchu a podobně) nebo změny teploty ovlivňují hodnotu emisivity a dochází k jejímu zkreslení.

2) Ohříváním měřeného vzorku na známou teplotu

Měřený objekt nebo jeho část o stejném materiálu, můžeme ohřát na známou teplotu. Poté se provede měřicím zařízením měření teploty. Pokud hodnota neodpovídá, je potřeba poupravit hodnotu nastavené emisivity. U této metody je nutné brát v potaz vlastnosti materiálů. Jestliže je těleso vyrobeno z dobře teplotně vodivého materiálu, může dojít k ochlazování povrchu během nastavování emisivity, poté je objekt potřeba znovu ohřát.

3) Využití nátěru nebo dodatečného materiálu se známou emisivitou

Při nižších teplotách lze na měřený objekt nalepit speciální plastovou nálepku se známou emisivitou. Měřicím přístrojem s nastavenou emisivitou se změří teplota této samolepky a následně měřeného objektu. Pokud teplota nebude odpovídat, je potřeba emisivitu upravit.

4) Využití jiné metody k měření teploty

S využitím jiné měřicí metody, zpravidla kontaktní metodou, se změří teplota objektu a na danou teplotu se kalibruje bezkontaktní měřicí přístroj. Kalibrace se opět provádí změnou emisivity. Využití kontaktní metody vede k požadavku dobrého kontaktu měřidla s měřeným objektem. Provádí se například termočláňkovými snímači.

Měření tepelných odrazů:

Tepelné odrazy jsou složeny z průměrné teploty okolních objektů vyskytujících se před měřeným objektem. Oproti emisivitě je určení tepelných odrazů poměrně snadné, lze je jednoduše měřit. Jedna z možností je nastavit emisivitu termokamery na hodnotu $\varepsilon = 1$ a změřit teplotu největšího tepelného zdroje. Tím bývá okolní prostředí neboli vzduch. S využitím plochy s dobrou odrazivostí (například hliníkové fólie) na níž se provede měření, získáme téměř přesnou hodnotu tepelného odrazu prostředí.

3 TERMOGRAFIE

[5], [13], [14]

Infračervené záření je záření, které není možné vidět pouhým okem. Jeho vlnová délka je příliš dlouhá na to aby jej oko dokázalo zachytit a zpracovat. Jedná se o část elektromagnetického spektra, které vnímáme jako teplo. Každý materiál nad absolutní nulou teplo vyzařuje. Termografie nám dovoluje zobrazit ve viditelném spektru teplotní pole měřeného objektu, ale pouze na jeho povrchu. K zobrazení se využívají takzvané termogramy neboli termovizní snímky. Obor termografie se rozvinul spolu s rozšířením prvních infračervených kamer, kterým se obecně říká termovizní kamery (termovize).

Termografie má již nenahraditelný význam v praxi. Její uplatnění se najde v mnoha vědních oborech i v běžném průmyslu či zdravotnictví.

Využití termografie:

- Vyhledávání úniků tepla (stavebnictví)
- Sledování elektrických vedení a analýza jejich poškození (energetika)
- Detekce zánětů/nádorů pod kůží (zdravotnictví)
- Detekce pohybu osob nebo jiných organismů (bezpečnost)
- Měření rozložení teplot (věda a výzkum)
- Měření mechanicky namáhaných strojů (průmysl)
- Noční vidění (armádní využití)
- Detekce úniku plynu (bezpečnost)

3.1 Termogram

Termogram/termovizní snímek je obraz pořízený termovizní kamerou na základě měřeného IR záření. IR záření je pro lidské oko neviditelné, a proto se termovizní snímky vizualizují do viditelného spektra za pomoci různých barevných palet, které přiřazují barvu jednotlivým teplotám. Jeden snímek lze zobrazit v odlišných barevných paletách, a tím zviditelnit jiná místa. Záleží na požadavcích při prováděné analýze.

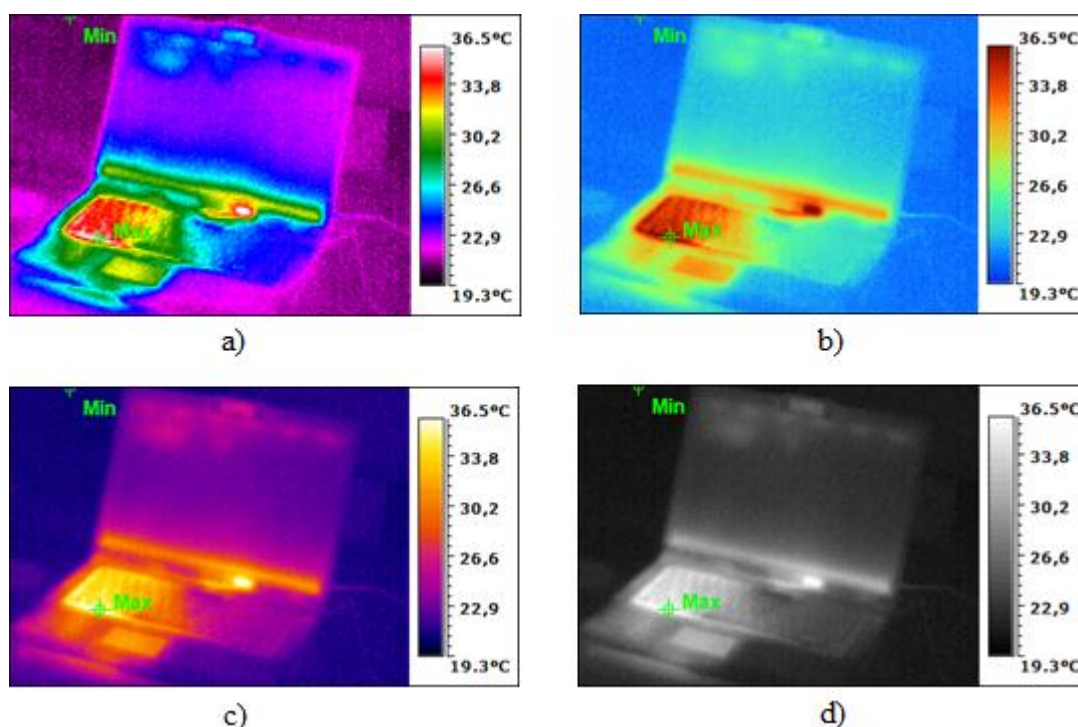
Základní barevné palety využívané v termografii:

- Rainbow (duha)
- Hot/Cold (teplo/zima)
- Iron (železo)
- Gray (stupně šedi)

Termogramy se dělí na radiometrické (radiometric) a zobrazující (imaging). Zobrazující termogramy jsou určeny výhradně k bezpečnostním a sledovacím účelům, neprovádí se kvantitativní vyhodnocení termálních snímků. Radiometrické termogramy lze kvantitativně vyhodnocovat, nesou údaj o teplotě v daném bodě. V plně

radiometrickém termogramu lze upravovat parametry snímku (emisivitu) a měřit teploty i po jeho uložení.

Naměřenou teplotu v bodě může ovlivnit i velikost obrazového bodu detektoru. Pokud proběhne měření v příliš velké vzdálenosti, může měřený objekt dosáhnout velikosti menší než je obrazový bod detektoru. V daném případě se do měření vnese nejistota měření způsobená okolím a výsledek nelze dále interpretovat a zpracovávat.



Obr. 5: Barevné palety (a - Rainbow, b - Hot/Cold, c - Iron, d - Gray)

Paleta hot/cold zobrazená na obr. 5 - b je pro lidské oko nejlépe vnímána ve smyslu teplota/barva. Přejít mezi maximy je ale pozvolný. Pozvolný přechod barev degraduje rozlišovací schopnost ve středních teplotách, ale naopak jsou dobře rozpoznatelné chladné oblasti a oblasti s vysokou teplotou.

Paleta gray definuje teplotu pouze na základě odstínu šedi. Šedotónový obraz je výhodný pro detekci oblastí nebo porozumění obrazu pomocí počítačových algoritmů. Každý obrazový bod je definován pouze jedním parametrem vystihujícím jeho intenzitu. Oproti barevným paletám odpadá potřeba jejich porozumění. Každý barevný obraz se při zpracování rozkládá na tři složky R (red), G (green) a B (blue). Například paleta rainbow vzniká aditivním mícháním barev. Při počítačovém zpracování je potřeba nejprve identifikovat kombinace barevných složek tvořící teplotní rozsah a následně data zpracovat.

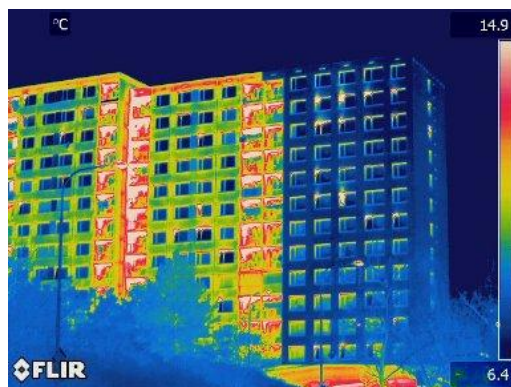
3.2 Využití termografie v praxi

[5], [9], [10]

Uvedené obory jsou pouze pro získání přehledu základních principů měření. Aplikací využívajících termovizního měření je mnohem více, ale využívají v zásadě stejných nebo podobných principů.

Stavebnictví:

Zejména v posledních letech se ve velkém využívá termografie k měření úniků tepla na povrchu stavebních konstrukcí. Pomáhají odhalit konstrukční vady vzniklé špatně odvedenou prací, stářím objektu, navlhání zdiva a tepelné mosty. I při takto rozsáhlých měření je potřeba dbát na zásady bezchybného měření. Největší překážkou je samotná teplota okolí. Tento druh měření se může provádět pouze v zimním období, kdy je odstup venkovních teplot znatelný od teplot uvnitř konstrukce.



Obr. 6: Termografie ve stavebnictví, zateplený/nezateplený panelový dům [16]

Srovnání dvou panelových domů, z nichž je jeden před provedeným zateplením a druhý po zateplení viz obr. 6. Zateplený panelový dům vykazuje daleko menší tepelné úniky za totožných okolních podmínek.

Průmysl:

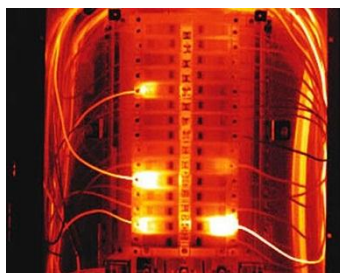
Diagnostika v odvětví:

- Elektroinstalace
- Mechanicky namáhané stroje
- Hledání potrubí, detekce úniků
- Fotovoltaické elektrárny

V průmyslu má termografie dvojí hlavní využití. Přesné měření vysokých teplot a jejich rozprostření na povrchu materiálů popřípadě sledování procesu tuhnutí a bezpečnostní využití ve smyslu předcházení nákladných havárií průběžnými prevencemi.

První využití se uplatňuje hlavně v hutním průmyslu při slévání a tepelné úpravě kovů, měření rozložení teploty na plášti průmyslových strojů, měření rozložení teploty

plamene hořáku atd. Zásadní výhodou je bezkontaktní měření, možné i přes transparentní materiály.



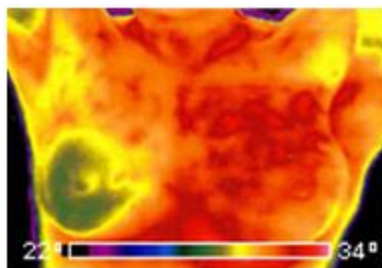
Obr. 7: Termografie v průmyslu, detekce přechodových jevů [16]

V oblasti bezpečnosti se termografie využívá převážně k monitoringu elektrických a mechanicky namáhaných zařízení, pro identifikaci případných závad již v prvotních stádiích. Na obr. 7 je znázorněna svorkovnice s přivedenými vodiči. V určitých spojích vznikl vysoký přechodový odpor, který zapříčinil zvýšení procházejícího proudu. Pokud by se přechodový odpor i nadále zvyšoval, mohlo by dojít až k požáru.

K velkému rozšíření termografie došlo i u diagnostiky fotovoltaických panelů, díky masivní výstavbě solárních elektráren. Měření na fotovoltaických panelech odhalí závadné sektory, ale také lze využít ke kontrole výkonu. Solární zařízení dodávají maximální výkon při plném slunečním svitu. Poškozené články mohou zapříčinit mimořádný nárůst teploty vedoucí opět k vzniku požáru.

Zdravotnictví:

Lidské tělo jako většina organismů samo o sobě produkuje teplo. Pokud v organismu dochází k určitým změnám způsobeným onemocněním, neprokrvením nebo jiným změnám metabolismu, projeví se tato změna i na teplotní struktuře. Pomocí termografických metod je možné předejít závažným onemocněním v prvotních stádiích vzniku. Diagnostika lze rozdělit do dvou skupin. V první skupině se jedná o nalezení ložisek zánětů a infekcí, které vedou k zvýšení teploty infikované oblasti. Druhou skupinou je nedokrvení, projevující se naopak snížením teploty postižené oblasti.



Obr. 8: Termografie ve zdravotnictví, detekce kožních/podkožních viróz [16]

Hlavním zástupcem první skupiny jsou nádorové onemocnění. U nádorových onemocnění je potřeba infikovaná ložiska odhalit pokud možno v prvotních stádiích. V důsledku patologických procesů dochází v oblasti nádorů k zvýšené emisivitě IR

zařízení. Pokud se jedná o nádory na vnitřních orgánech, je jejich odhalení v prvotním stádiu na základě termografie výrazně snížena, ale je možná. Vlivem tepelných odrazů dochází k potlačení nízkých teplotních změn.

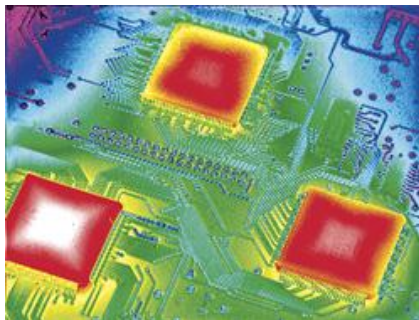
Diagnostika lidského těla je značně komplikovaná, protože dochází k ovlivnění měření z mnoha hledisek. Lidské tělo si udržuje ve zdravém stavu přibližnou teplotu okolo 36°C a 37°C. Před samotným měřením musí dojít k adaptaci těla na výrazně nižší teplotu, aby byly změny patrnější. V místech výskytu ochlupení dochází k zadržování tepla a tedy k degradaci měření. Stejně jako ochlupení také otlačení způsobují zvýšení teploty (zvýšená koncentrace krve). Měření by měl provádět kvalifikovaný lékař, který zná anatomii lidského těla a může vyloučit všechny nežádoucí vlivy s následnou odbornou analýzou naměřených dat.

Věda a výzkum:

Jedná se o další významnou oblast v termografii. Využití najde v následujících odvětvích:

- Vývoj materiálů
- Kontrola kvality
- Nedestruktivní defektoskopii
- Rozložení teplot na DPS

Využívá se hlavně v případech, kdy je potřeba nedestruktivní metodou otestovat materiály (elektronické součástky) a analyzovat termogramy v reálném čase s možností ukládání záznamů statických i dynamických dějů.



Obr. 9: Termografie ve vědě a výzkumu, rozložení teplot na DPS [16]

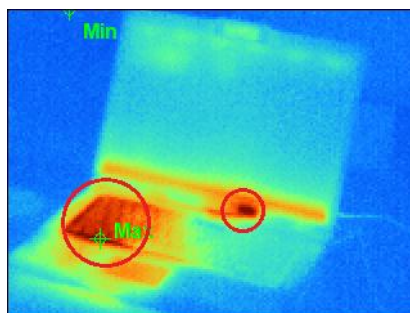
Termografie v slaboproudé elektronice podává informace o rozložení teplot na DPS. Na základě této informace se upraví rozmístění součástek tak, aby se minimalizovalo ovlivnění tepelně závislých částí, případně se implementuje chladicí mechanismus. Jak již bylo v mnoha případech zmíněno, nesprávná funkce určitého zařízení, vada součástek, vada materiálů, vada vodičů a podobně, se ve většině případů projevuje teplotními změnami. Pokud není přímým důsledkem nesprávné funkce teplotní změna, je možné vady odhalit teplotním působením (ohřev, ochlazení) na objekt a následnou teplotní analýzou vady odhalit.

4 NÁVRH MĚŘÍCIHO PRACOVISTĚ

Práci je možné rozvrhnout do několika částí. Jako první část lze označit návrh měřené scény, kde je nutno rozvážit vhodné pozadí vzhledem k měřeným veličinám. Obecně termokamery nepracují s vizuálním spektrem jako lidské oko, ale s IR spektrem, které vyžaduje jiný přístup k realizaci scény. Druhou částí je získání samotných dat z termokamery používané v této práci. Termokamera Guide EasIR-4 má k dispozici rozhraní mikro USB, ale vzhledem k možnostem, které nabízí je pro účely práce nevyužitelné. Třetí a taky nejrozsáhlejší částí je realizace celkového systému a zpracování obrazových dat. Jedná se o kalibraci termokamery s projekčním zařízením, porozumění získaným datům a následné vyhodnocování, rektifikaci obrazu a podobně. Čtvrtá část obsahuje návrh GUI neboli uživatelského rozhraní, pro snadné ovládání celého systému a reprezentaci výsledků. Poslední pátá část podává analýzu naměřených dat a souhrn vlivů působících při měření.

Všech pět částí ve výsledku zprostředkují měření vyzářeného tepla objektu ve scéně s následnou zpětnou projekci zpracovaných a upravených dat. U rozsáhlých měření, která jsou prováděna ve stavebnictví a v průmyslu, nenajde tato práce vysokého uplatnění. Projekty dosahují jednak značných rozměrů a ani není potřeba v reálném čase pozorovat na specifických místech teplotní změny. V častých případech společnost, realizující tato měření, není ani koncovým odběratelem, nýbrž pouze zprostředkovatelem, který musí vystavit dokument o měření pro zadavatele. V takových případech jsou dostačující pouze statické snímky s následnou analýzou.

Hlavní využití této práce najde v oblasti výzkumu/vývoje, zdravotnictví a například detekci vad teplotně závislých materiálů. Uživatel má možnost pozorovat aktuální změny přímo na měřeném objektu s přesnou lokalizací. Není potřeba k získaným datům (termogramům) zpětné srovnávání a určení, o jaké body se jedná v měřené scéně. V případě výzkumu, návrhu DPS lze promítnout rozložení teplot na jednotlivé součástky a za běhu pozorovat jejich změny se změnou zatížení.



Obr. 10: Rozložení teplot na notebooku

Obr. 10 vystihuje takový druh měření. S proměnlivým zatížením notebooku se mění teplotně závislé oblasti. Při spuštění z počátku nebudou detekovány žádné výrazné

teplotní změny. S dobou provozu, ale lze pozorovat značné zvýšení teplot v oblasti HDD, grafiky, chladiče CPU a zvýšený nárůst teploty v oblasti podsvícení LCD.

Podstatný přínos lze hledat také v oblasti zdravotnictví. Lékař se může věnovat u pacienta pouze diagnostice daného problému. Veškeré teplotní změny způsobené podněty například chladu, tepla, tlaku, jsou pozorovány v R-T přímo na pacientovi. Navíc i nepatrné změny mohou být zviditelněny pomocí softwarového předzpracování. Dochází k využití počítačového vidění rozšířené o prvky počítačové grafiky (rozšířená realita), jejíž pomocí lze potlačit nepotřebná data a zvýraznit potřebná, což zvyšuje pravděpodobnost odhalení problémů v podobě kožních zánětů.

4.1 Termovizní kamera Guide EasIR – 4

Práce je realizována s termokamerou značky Guide EasIR-4. Jedná se o typ levnější termokamery pro nenáročná měření. Mohou jí obsluhovat naprostí začátečníci, aniž by museli být vyškoleni. Přístroj je vybaven infračervenou kamerou a kamerou pro snímání ve viditelném spektru. Obraz viditelného spektra a termogram lze při měření směřovat, a je tak získána lepší orientace o zaměřených bodech. IR detektor je typu nechlazeného mikrobolometru poskytující rozlišení 160x120 obrazových bodů. Jako detektor viditelného spektra je použit snímač CMOS s rozlišení 1600x1200 obrazových bodů.

K uložení snímků lze použít SD kartu nebo rozhraní mikro USB 2.0. Výrobce udává možnost využití mikro USB k přenosu obrazu v reálném čase (termální i optický snímek) a k přenosu živého videa. [1]



Obr. 11: Termovizní kamera EasIR-4 [1]

4.1.1 Komunikační rozhraní termovizní kamery

V zásadě se připojení termokamery k PC pomocí USB dá rozdělit na dva režimy. Připojení k USB při zapnutém stavu termokamery a připojení při vypnutém stavu s následným spuštěním. V prvním případě dojde k zastavení obrazu termokamery a v PC jsou zpřístupněna data na SD kartě. Obraz je opět obnoven, až dojde k ukončení režimu USB. V druhém případě má dojít k zpřístupnění dat i v aktivním režimu s možností natáčení videa a RT zpracovávání snímků. Zde se vyskytly problémy s ovladačem k USB, při instalaci dochází k zhroucení systému windows 7 i starší verze windows XP. Výrobce dodává ovladače pro 32 i 64 bitovou verzi operačního systému. Obě varianty vedou ke stejnému výsledku. K jisté komunikaci mezi termokamerou a stolním počítačem dochází po vysunutí paměťové karty. Data (pouze video) jsou však zpřístupněna pouze přes software Guide IrAnalyser. Využití USB rozhraní pro záměr práce lze označit za nevhodné. Přístup k videu přes software Guide IrAnalyser vyžaduje nahrávání dat na disk, během kterého nejsou přístupná. Dochází k znemožnění práce v RT a samotná obsluha je značně komplikovaná.

Termovizní kamera disponuje také analogovým výstupem, který je možné využít za pomoci frame graberu k RT vyčítání dat. Při zpracovávání obrazu ve formátu NTSC, ale docházelo ke zkreslení obrazu ve formě řádkování, proto byl volen evropský formát typu PAL. Komunikace přes analogové rozhraní se projevila jako jediná možná varianta, aby byly splněny podmínky práce v RT.

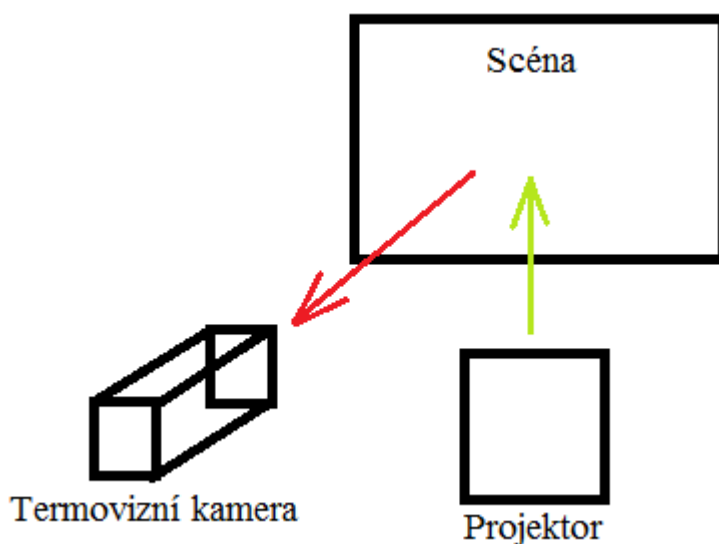
Frame graber od společnosti Imaging Source

Frame graber je použit od společnosti Imaging Source typ DFG/USB2-LT. Vstupní signál (analogový) se připojuje CINCH konektory, výstupní rozhraní je typu USB 2.0 B. Podporované analogové video formáty: PAL a NTSC. Převod signálu typu PAL lze realizovat na maximální rozlišení 768x576 px při 25 fps. Signál typu NTSC může být převeden na maximální rozlišení 640x480 px při 30 fps. Tyto hodnoty jsou zcela dostačující, protože signál zpracováváný z termovizní kamery dosahuje rozlišení maximálně 160x120 px (rozlišení mikrobolometru termokamery).

Čtení dat v realizované aplikaci je nastaveno na rozlišení 640x480. Při nižším rozlišení docházelo k vyčítání obrazu v šedotónovém modelu anebo značně ořezaného o důležitá data. Obdobných výsledku bylo dosaženo i v prostředí MATLAB s využitím toolboxu Image Acquisition využívaného pro práci s kamerovými systémy. Z největší pravděpodobnosti se jedná o nekompatibilitu termokamery a frame graberu o daném rozlišení.

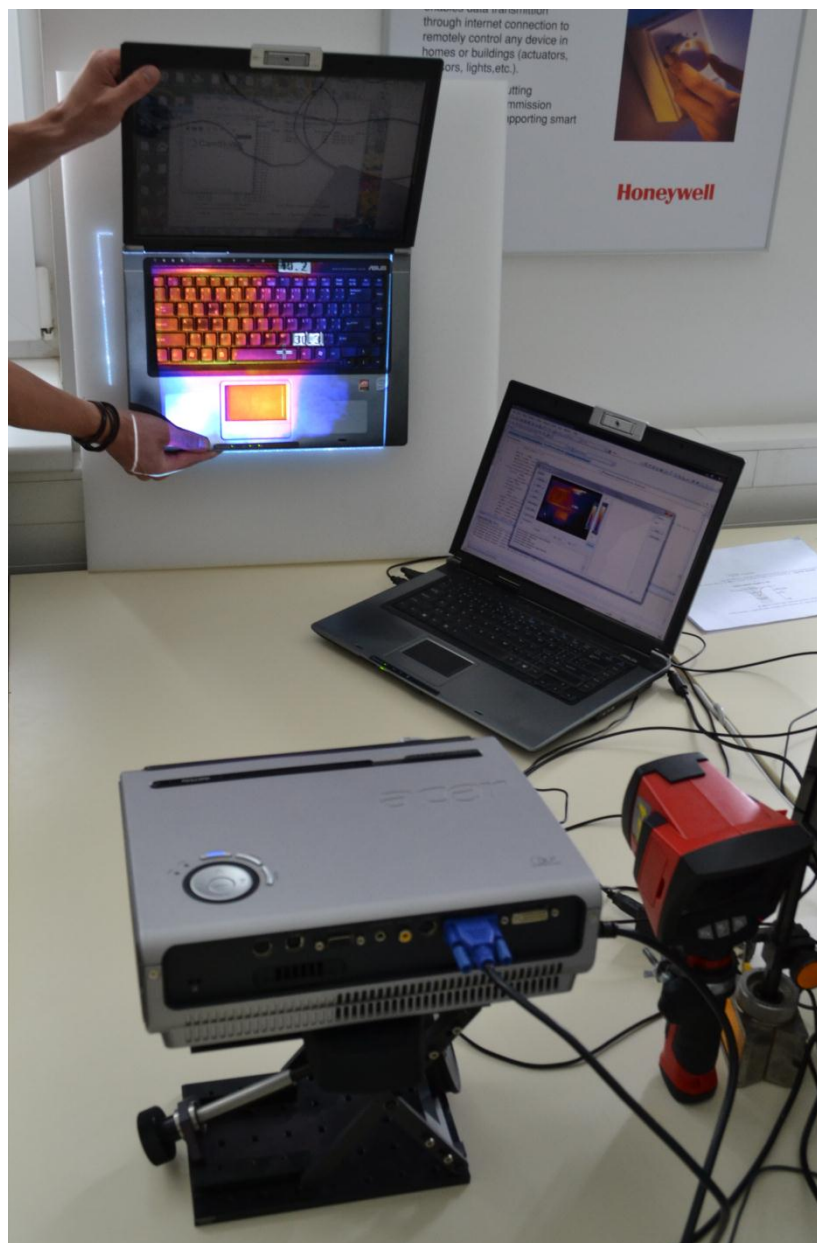
4.2 Realizace pracoviště

Měřicí pracoviště je realizováno termovizní kamerou Guide EasIR-4 a ke zpětné projekci je využito projekčního zařízení. Příjem dat (termovizní kamera) a vysílání dat (projekční zařízení) nebude za reálných podmínek možné realizovat z jednoho bodu. Vždy dojde k posunu jednoho zařízení od druhého. Z daného vyplývá nutnost transformace obrazu z roviny snímáče do roviny vysílače (rektifikace). Návrh rozmístění zařízení vzhledem ke scéně je možné provést ve třech kombinacích. Termovizní kamera umístěna v normále měřené scény a projektor v libovolné poloze, termovizní kamera i projektor v libovolné poloze a poslední případ projektor umístěn v normále měřené scény a termovizní kamera v libovolné poloze. V zásadě lze realizovat každý ze zmíněných způsobů, protože je prováděna kalibrace obou přístrojů na kalibrační body ve scéně. Jako ideální varianta se jeví projektor v normále scény. Scéna je rovnoměrně osvětlena a nevznikají případné stíny vzniklé nerovnoměrným povrchem měřeného objektu.



Obr. 12: Realizace měřicího systému

K minimalizaci zkreslení, způsobeného rozdílnou pozicí přijímače a vysílače, je potřeba oba přístroje vzájemně co nejvíce přiblížit. Jak již bylo zmíněno, povrch objektu ve scéně nemusí být rovnoměrně rozložen. Snímání takového objektu z většího úhlu vytvoří skrytá místa, která nemohou být zaznamenána. Získaná data obsahují ztráty teplotních informací v zastíněných oblastech, ale k projekci na tyto oblasti bude docházet a navíc s chybným údajem. K bezchybnému měření je třeba minimalizovat vzájemnou polohu přístrojů, respektive umístit přístroje do jednoho bodu. Výsledné a doporučené rozmístění prvků v pracovišti je zobrazeno na obr. 13.



Obr. 13: Měřicí pracoviště

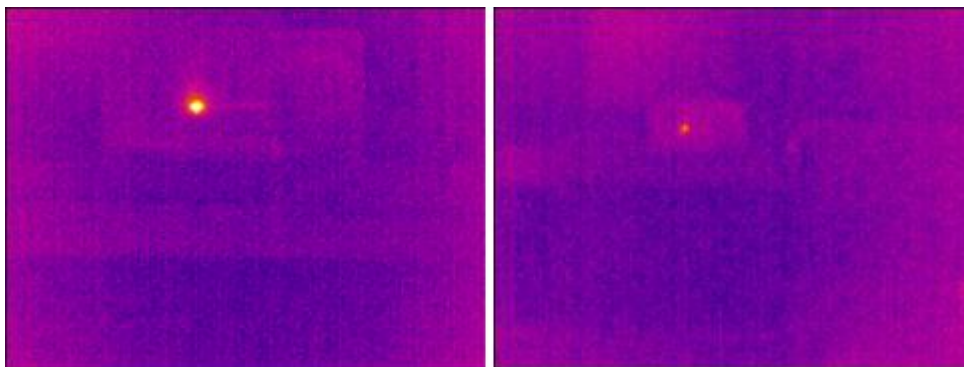
4.3 Kalibrace termovizní kamery s projekčním zařízením

Ke kalibraci je potřeba realizovat značky ve scéně s ohledem na jejich detekci jednak po vizuální stránce a jedna po teplotní stránce. Značky ve scéně představují prvky provazující termokameru s projektorem. Po jejich detekci jednotlivými přístroji je také známa rovina přístrojů vzhledem ke scéně. Tento údaj je důležitý k transformaci obrazu z roviny termokamery do roviny projektoru. Kalibrace termokamery proběhne na základě nalezení tepelných značek v obraze. Projekční zařízení je potřeba kalibrovat uživatelem za pomoci ukazatele myši. Poloha jednotlivých značek ve scéně se uloží jejich označením. Výsledná projekční plocha systému je obdélníkového typu v poměru stran odpovídající poměru rozlišení termokamery. Vzdálenost od měřené scény je pro

termokameru a projektor individuální, obraz je upravován tak, aby vždy vyplnil plochu vyhrazenou kalibračními značkami.

Jako kalibrační značky byly testovány kovové materiály (matky, tvrzený alobal) ohříváné teplou vodou z vodovodu nebo fénem. Teplota vody dosahovala 40°C, ale pro účely kalibrace byla nedostačující. Značky v termogramu byly značně potlačeny a velice rychle docházelo k zpětnému ochlazení na teplotu okolí (velká tepelná vodivost materiálu). Opačný efekt (podchlazení) se ukázal rovněž jako nedostačující. Teplota vody neklesla pod 16°C, není splněna dostatečná podmínka odstupu měřené teploty od šumu okolí.

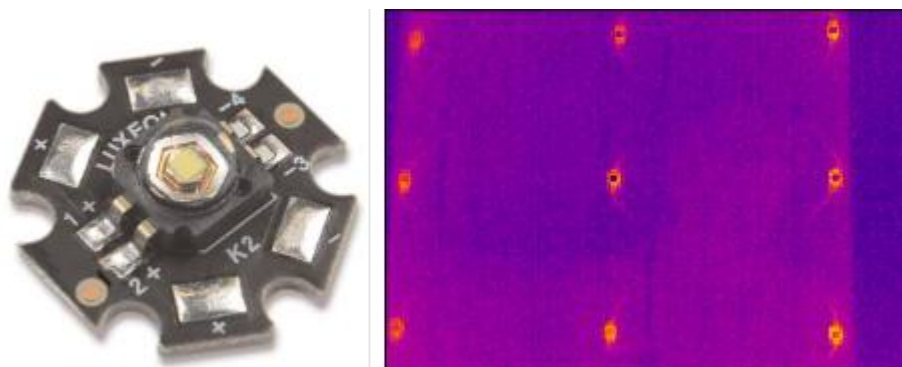
Pasivní ohřev/ochlazení materiálu se nedá označit za vhodnou variantu ani z hlediska obsluhy. Přistoupilo se k odzkoušení aktivního zdroje ohřevu pomocí led diod. Při běžném provozu led diody je doporučený mezní proud 20mA, záleží na typu a barvě zářiče. Při takovém proudu dochází pouze k zanedbatelnému ohřevu a detekování pomocí termokamery je možné až po dlouhém časovém intervalu a z krátké vzdálenosti. Pro zvýšení teploty a rychlosti ohřevu byl proud zvýšen nárazově na trojnásobek doporučené hodnoty tedy 60mA. Za časový interval 30s bylo docíleno stabilní teploty okolo 40°C. Vzhledem k teplotě okolí 25°C jsou kalibrační značky uspokojivě detekovány maximálně do vzdálenosti 3 metrů. Ve vzdálenosti 3 metry od “tepelného” zdroje musela být termokamera několikrát ostřena a vhodně nastavován teplotní rozsah, aby bylo docíleno použitelných výsledků.



Obr. 14: Led kalibrační značka, vzdálenost 1m a 3m

Během měření není předpokládána větší vzdálenost mezi termokamerou a měřenou scénou než dva metry. Kalibrační značky typu led diod jsou dostačující, ale nárazové navýšení proudu může vést k postupné degradaci.

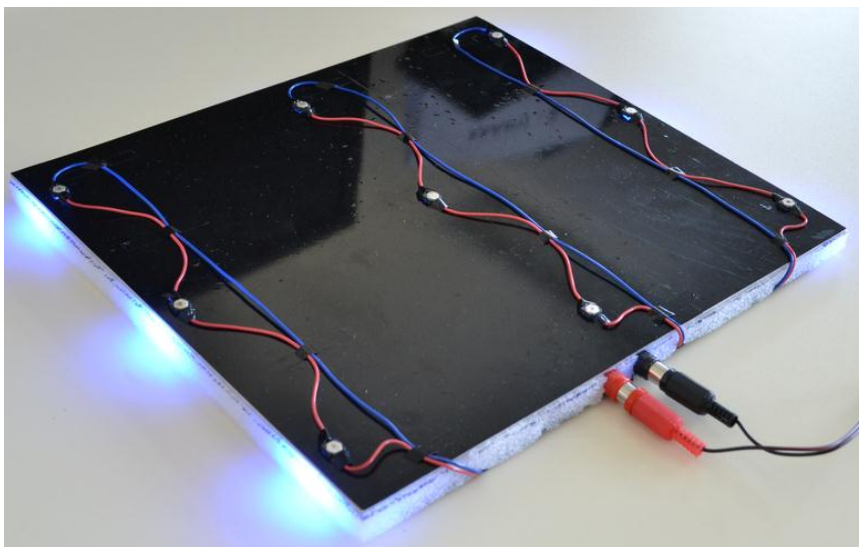
Oproti standardním led diodám, výkonové led diody jsou přizpůsobené na daleko vyšší proudy a také dokážou vyprodukovat výrazně vyšší teplo. Přistoupilo se k otestování vzorků výkonových led diod od společnosti PHILIPS LUXEON K2, které mají doporučený mezní proud až 300mA a dosahují bez nutnosti externího chlazení teploty až 70°C na chladicí plošce. Chladicí ploška je navíc kruhového tvaru a dochází k téměř rovnoměrnému rozložení tepla.



Obr. 15: Výkonová led dioda, LUXEON K2 [7]

Pro kalibraci termokamery prokázaly výkonové led diody nejlepší vlastnosti a využily se k realizaci přenosné kalibrační desky. Prostor na desce ohraničený kalibračními body dosahuje rozměrů 280x210mm, poměr stran vychází z poměru stran rozlišení termogramu (4:3). Rozměr je dostačující k provedení měření rozložení teplot na kůži dospělé lidské ruky. V případě potřeby lze kalibrační plochu rozšířit na několikanásobnou velikost, ale za předpokladu ztráty přesnosti. S většími rozměry plochy roste požadavek na vzdálenost projektoru od projekční plochy. Dochází ke ztrátě rozlišovací schopnosti z důvodu nedostačujícího rozlišení termogramu z kamery.

Kalibrační deska je realizována 9 výkonovými led diodami připevněnými na předvrtaném hliníkovém základu pokrytém izolační fólií. Spodní strana je tvořena pěnovým polystyrénem pro eliminaci poškození čipu, který je obalen pouze silikonovou vrstvou. Zapojení led diod je využito sérioparalelní, v každé větvi 3 led diody. Intenzita záření je závislá na velikosti protékaného proudu. Z toho plyne požadavek na napájení ze zdroje proudu a nejlépe se samostatným zdrojem pro každou větev. Při testování kalibrace bylo přistoupeno k využití laboratorního zdroje s omezením proudu. Je však nutné hlídat protékaný proud, aby nedošlo k destrukci led diod. V tomto zapojení je zcela dostačující vstupní proud 300mA, během 20 sekund je dosažena přibližná teplota 40°C.



Obr. 16: Kalibrační deska

Kalibrační deska je realizována jako přenosná, lze provést kalibraci například i na zed' bez využívání navržené podkladové plochy (pěnový polystyrén) nebo v prostoru. Kalibrace v prostoru umožňuje měření na předmětech se značnou hloubkou, ale je nutno udržet kalibrační rovinu. Při vzdálenosti projekčního zařízení 1,5m od kalibrační roviny znehodnocuje měření i 1cm vychýlení z roviny.

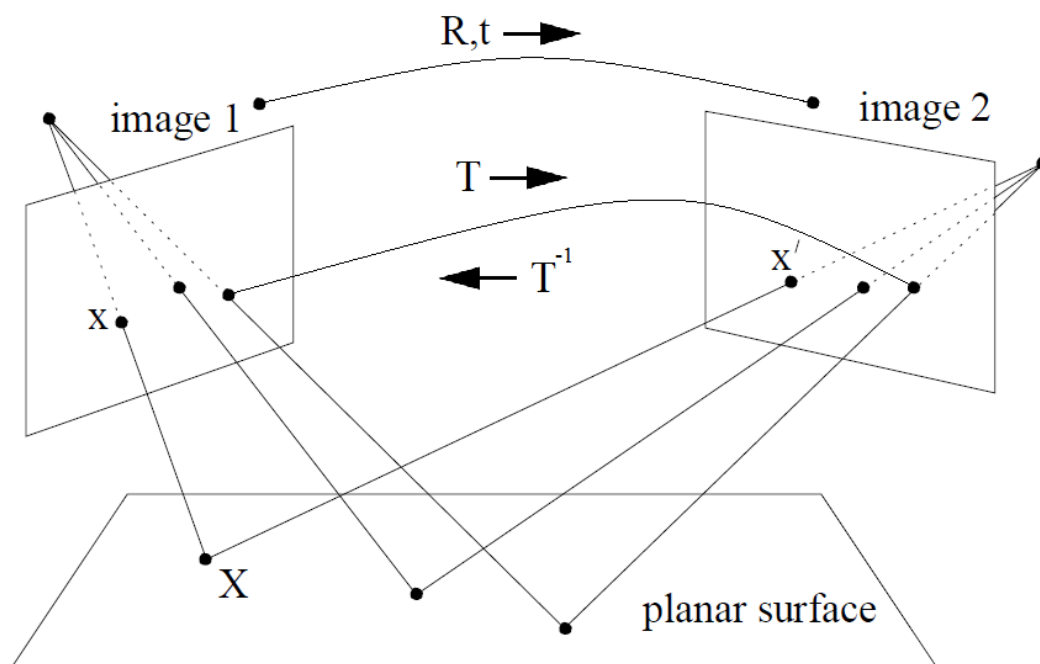
Plocha desky je pokryta lesklou fólií, která prokazuje značnou reflexi okolních tepelných zdrojů. Pro samotnou kalibraci je reflexe zanedbatelná, pokud se nevyskytují v okolí výrazné tepelné zdroje s intenzitou podobnou nebo vyšší kalibračním bodům. Během měření je deska odejmuta a k ovlivnění měření nedochází. Reflexi lze značně ovlivnit samotným nastavením termokamery viz kapitola 2.2 Pyrometrie.

4.4 Rektifikace

[19], [20]

Jakákoliv úprava snímku za účelem opravy jeho vady se obecně nazývá rektifikace. V našem případě rektifikace znamená změnu projekční roviny obrazu z roviny snímače do roviny projektoru. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2 Realizace pracoviště, projekční zařízení a snímací zařízení nejsou a ani nemohou být v jedné rovině. Snímání scény dochází pod určitým, nám neznámým, úhlem přičemž zpětná projekce je realizována z roviny v normále scény. Princip rektifikace je znázorněn na obr. 17, jedná se o obecnou transformaci obrazu do jiné roviny. Image 1 znázorňuje rovinu snímače, do kterého se promítá bod X na bod x . Rektifikace stanoví novou rovinu (image 2), do které se bod x transformuje na bod x' . Stejným principem dojde k přetransformování všech bodů obrazu. Obr. 17 nevystihuje zcela náš případ, rovina image 2 by měl být kolmá na snímanou scénu. Výsledkem získáme obraz scény, jako kdyby byla snímána z normály scény.

K vlastní rektifikaci obrazu je nutné vypočítat transformační matici T . Tato matice reprezentuje tři základní operace s geometrickými objekty: rotaci, translaci a změnu měřítka. Ve 2D souřadnicích lze rotaci a posunutí realizovat pomocí matice o velikosti 2x2, translaci již nikoliv. Proto se zavádí třetí souřadnice – homogenní souřadnice. Výhodným a praktickým aspektem homogenního souřadného systému je unifikace rotace, změny měřítka a posunu geometrických objektů.



Obr. 17: Rektifikace obrazu do jiné roviny

Výpočet transformační matice pomocí homogenního souřadného systému je následující:

$$(x', y') = T(x, y) \quad (8)$$

Homogenní souřadný systém vznikne zavedením třetí souřadnice nazývané váha W . Přepsáním rovnice (8) do maticového zápisu a doplněním o váhovou souřadnici dostaneme:

$$\begin{bmatrix} x'W \\ y'W \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$x' = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \quad (10)$$

$$y' = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1} \quad (11)$$

Úpravou rovnic dostáváme tvar:

$$x' = ax + by + c - x'gx - x'hy \quad (12)$$

$$y' = dx + ey + f - y'gx - y'hy \quad (13)$$

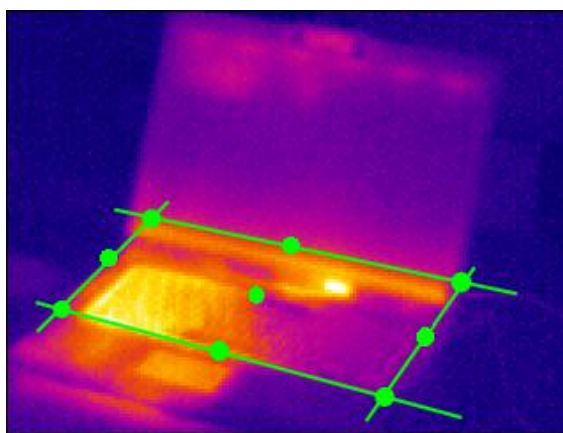
Výsledkem jsou dvě rovnice s osmi stupni volnosti. K transformaci obrazu z jedné roviny do druhé potřebujeme minimálně čtyři korespondující body, po té dostáváme osm rovnic pro osm neznámých proměnných tvořící transformační matici.

Přímá transformace vede k několika nežádoucím efektům. Souřadnice ve výstupním obraze se mohou nacházet mimo zvolený rastr. Několik vstupních pixelů může být zobrazeno do stejného bodu. A některým výstupním pixelům nemusí být přiřazena hodnota ze vstupního obrazu. Výše zmíněné má za následek vznik děr. Jako lepší varianta se jeví využít zpětnou transformaci T^{-1} , kdy pro každou polohu pixelu ve výstupním obraze se hledá poloha ve vstupním obraze. Nutnou podmínkou existence inverzní matice je regulárnost matice T .

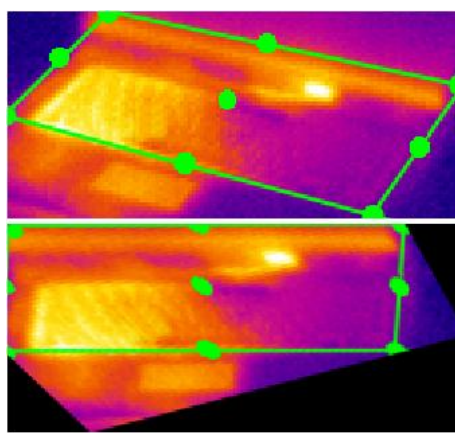
$$(x, y) = T^{-1}(x', y') \quad (14)$$

4.4.1 Realizace rektifikace

Rektifikace je prováděna za účelem transformace snímaného obrazu do roviny projektoru. V zásadě byly možné tři varianty rozmístění techniky rozebrané v kapitole 4.2 Realizace pracoviště. Vybrána byla varianta umístění projektoru v normále scény, přičemž snímací zařízení se může vyskytovat takřka v libovolné, nám neznámé poloze. Z požadavků na scénu je zaručena statická poloha kalibračních značek rozmístěných ve tvaru obdélníku (v poměru stran 4:3 - rozlišení termokamery). Případné zkreslení v podobě sbíhání, rozebíhání linií je tato vada odhalena vzájemnou polohou značek při kalibraci. Během kalibrace dochází k vypočtení transformační matice, která je následně uplatněna na každém snímku videa. Výsledná názorná ukázka rektifikace je vidět na obr. 19



Obr. 18: Obraz před rektifikací



Obr. 19: Rektifikace zvolené oblasti

4.5 Volba scény

Návrh scény vyžaduje jiný přístup než u běžných aplikací při zpracování vizuálních dat. Není potřeba volit vhodné osvětlení nebo podklady na kompenzaci stínů, protože není pracováno s vizuálním spektrem, ale s IR spektrem, které není pro lidské oko ani pro běžné kamery viditelné. Hlavní úlohou při návrhu měřené scény v IR spektru je volba materiálu podkladové plochy a umístění celého systému mimo dosah teplotních změn (teplotní změny v okolí). Obě tyto úlohy s sebou úzce souvisí a je potřeba co nejvíce zamezit případnému ovlivňování měřeného objektu. Pro přesné měření a zvýraznění vad/defektů je vhodné zvolit prostředí s teplotou okolo pokojové teploty (20°C), pro dostatečný odstup měřeného signálu od šumu okolí.

Požadavky na podkladovou plochu:

- Vysoká emisivita
- Nízká reflexivita
- Žádná transmisivita
- Vysoká tepelná izolace
- Možnost regulace teploty

Nízká reflexivita a transmisivita vychází z požadavku vysoké emisivity. Pokud by reflexivita dosahovala příliš vysokých hodnot, docházelo by k tepelným odrazům a následnému zkreslení měření. Transmisivitu lze vyloučit, protože se neuplatňuje u pevných materiálů. Důležitou vlastností je tepelná izolace materiálů, aby jeho působením nedocházelo k ohřívání/ochlazování měřeného objektu.

S přihlédnutím k zmíněným kritériím byla vybrána podkladová plocha z pěnového polystyrénu. Jedná se o dobrý izolační materiál, který splňuje výše uvedené požadavky. I když se projektor vyskytuje v relativně blízké vzdálenosti, při zkušebních měření přibližně 1,5m, nedochází k ovlivnění měření tepelnými odrazy světelné lampy od podkladové plochy. Měření vlivu projekčního zařízení na samotné měření je zpracováno a rozebráno v kapitole 7 Analýza měření.

Jako u každého materiálu dochází i u zvolené podložky k vzájemnému předávání tepla. Pokud je objekt o jiné teplotě než okolí nebo jiný objekt dochází k přenosu tepla, a tím k snaze docílit tepelné rovnováhy. Teplo je energie předaná mezi systémem a okolím, šířením vnitřní energií systému se zabývá termodynamika. Obecně se dá říci, že kovové materiály mají vysokou tepelnou vodivost (Nerez ocel $\lambda=14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, Hliník $\lambda=235 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). To znamená, že dochází k rychlé výměně tepla s okolím. Pro naše potřeby, kdy je prioritou co nejméně ovlivnit měřený objekt, jsou kovové materiály nevhodné. Naopak například plasty, molitany, polystyrenová pěna a vzduch mají nízkou tepelnou vodivost $\lambda=0,048$ až $0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Z tohoto důvodu byl vybrán, jako podkladová plocha k měřicímu pracovišti, pěnový polystyrén. Struktura je tvořena velice tenkým plastovým materiálem a je vyplněna vzduchem. Odběr tepla z měřeného

objektu je pozvolný a na měření plánována realizovaným pracovištěm nemá významný vliv. [21]

Při krátkodobém měření dochází pouze k zanedbatelnému tepelnému otisku v době trvání řádu sekund. Nesporný vliv má také samotný měřený předmět. Jedná-li se o měření rozložení teplot na kůži například ruky, dochází k pocení na dlani a k růstu tepelného otisku. Otisk se může rozšířit až do okolí ruky (hlavně mezi prsty) a zkreslit měření zvýšeným tepelným vyzařováním v oblasti, kde se objekt nevyskytuje. Samozřejmě záleží na typu měření a požadované přesnosti. S termokamerou využívanou v této práci, zejména kvůli zpracovávání veškerých dat pouze z termogramu, můžeme takovou chybu zcela ignorovat.

Problém s tepelným otiskem rozptýleným nad rámec měřeného objektu lze řešit dvěma podobnými způsoby. Kalibrační deska má určitou tloušťku tzn. kalibrační rovina je nad podkladovou plochou. Objekt nemusí být, respektive neměl by být, zcela v kontaktu s podkladovou plochou (záleží na hloubce objektu). Druhou variantou je vytvořit kalibrační rovinu v prostoru. Kalibrační deska je realizována jako přenosná a lze ji uchytit na libovolné ploše nebo stojanu. V neměnné poloze musí setrvat pouze po dobu kalibrace. Po odebrání je však potřeba udržet objekt v kalibrační rovině, nebo bude docházet k nepřesnému zobrazení rozložení teplot.

5 REALIZACE A ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

Aplikace k zpracování dat z termokamery a zpětná projekce graficky doplněných dat je realizována v prostředí Microsoft Visual studio 2008 s využitím mimo jiné open source knihovny OpenCV 2.1. OpenCV knihovna obsahuje nespočet funkcí zaměřených na počítačové vidění a je optimalizována pro potřebu zpracování a klasifikaci obrazových dat v RT aplikacích. Samotná aplikace je realizována v C++ projektu využívající C funkce knihovny OpenCV a k vytvoření uživatelského rozhraní (GUI) byla využita knihovna MFC.

Projekt je rozvržen do tří hlavních souborů: `Uzivatske_rozhraNiDlg.h`, `termokamera.cpp` a `Uzivatske_rozhraNiDlg.cpp`. Hlavičkový soubor `Uzivatske_rozhraNiDlg.h` obsahuje deklaraci třídy `thermocamera` určené ke komunikaci, zpracování a vykreslení dat a třídy `CUzivatske_rozhraNiDlg` tvořenou automaticky generovanými prvky dle vkládaných komponent do GUI. Deklarace těl jednotlivých funkcí třídy `thermocamera` a inicializace proměnných je vytvořena v souboru `termokamera.cpp`. Tyto funkce, respektive třída `thermocamera` je zpřístupněna v `Uzivatske_rozhraNiDlg.cpp` reprezentující GUI obsahující inicializaci uživatelského rozhraní a deklaraci funkcí jednotlivých komponent v něm vložených.

5.1 Popis aplikace

Před spuštěním aplikace je potřeba zhotovit pracoviště viz kapitola 4.2 Realizace pracoviště. Projektor je značným zdrojem tepla, které je odvětráváno. Dle umístění odvětrávání volíme polohu termokamery buď na pravé, respektive levé straně.

Po spuštění aplikace je většina funkcí v uživatelském rozhraní deaktivována a jejich aktivace se provede až úspěšnou inicializací a následnou kalibrací termokamery s projektorem. Po inicializaci je možné v GUI sledovat obraz z termokamery v reálném čase, ale samotná projekce s měřením a zpracováním dat je zpřístupněna až po provedení kalibrace.

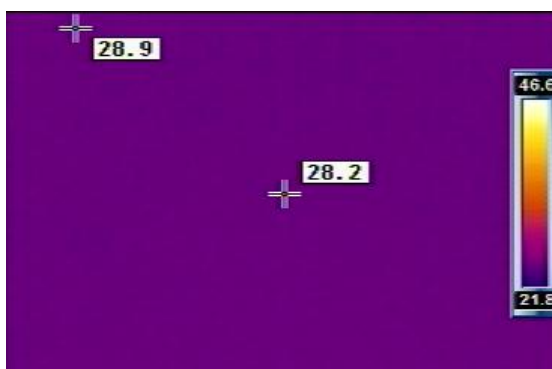
Před kalibrací je potřeba umístit do prostoru zájmu kalibrační plochu a připojit k proudovému zdroji. Doporučená hodnota proudu je cca 300mA (značně poddimenzováno, výkonové led diody jsou uzpůsobeny až na 1A v daném zapojení), dochází k postupnému ohřívání kalibračních značek a k jejich vynikání v termogramu. Po dosažení dostatečného odstupu teploty značek vůči okolí (přibližně 35°C na kalibračních bodech) lze provést kalibraci. Uživatel je vyzván k označení všech 9 bodů přes projekční zařízení. Následně je získán termogram a detekovány kalibrační značky. Vzájemným provázáním, změnou perspektivy získaného termogramu do roviny projekčního zařízení je kalibrace dokončena.

Kalibrací se zpřístupní uživateli všechny funkce GUI a vytvoří se promítací oblast zobrazující rozložení teplot přímo ve scéně. Zpřístupněné funkce obsahují možnost aktivace varovných hlášení při překročení zadané mezní teploty, zpracování dat v podobě zvýraznění diferencí, zvýraznění oblastí nad zadanou mezní teplotou, označení maxima/minima + zobrazení teplot, zobrazení teploty přímo ve scéně stiskem pravého tlačítka v daném místě, skrytí teplotních značek z termogramu do barev teploty pozadí a v neposlední řadě prolínání zvýrazněných informací se základním termogramem. Tyto funkce se vztahují ke grafickému vyobrazení na měřeném objektu ve scéně. V GUI lze pozorovat neupravené termogramy tak, jak jsou načítány přímo z termokamery.

Výše zmíněné funkce se vztahují k zvýraznění informací nesených v termogramu a vylepšit tak grafickým znázorněním detekci významných změn. Vedle zmíněných funkcí je realizováno měření v podobě vyčítání maximální, minimální a průměrné teploty v termogramu. Vzorkovací perioda je volitelná, posléze je data možné uložit do textového souboru .txt a následně data libovolně zpracovávat. Možnost ukládání není spjata pouze k naměřeným datům, ale je realizováno také ukládání jednotlivých termogramů do souboru .jpg a nebo uložení videa .avi.

5.1.1 Řešené problémy

Jak již bylo zmíněno, z termokamery nejsou získávána data v podobě teplotního rozložení, ale pouze data přes analogový výstup v podobě termogramů. Navíc v termogramu jsou obsaženy značky s teplotními údaji o středovém bodu a dynamicky vyhledávající maximum.



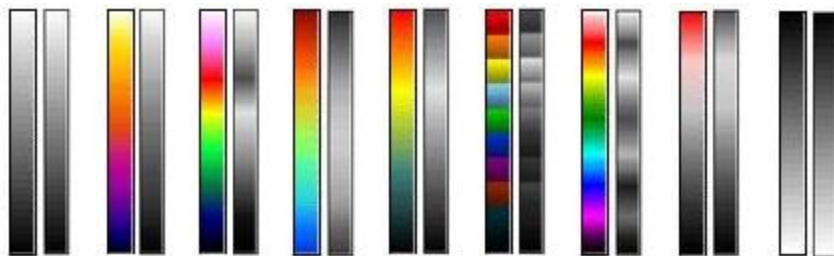
Obr. 20: Teplotní značky a paleta v termogramu

Prvotní úprava obrazu je ve smyslu úpravy rozlišení. V termogramu je obsažena paleta, která překrývá teplotní informace na daném místě. Její vypnutí popřípadě získání teplotních informací ve zmíněné oblasti není možné, a proto se každý získaný frame ořezává.

Teplotní značky obsažené v termogramu degradují všechny realizované funkce za účelem zvýraznění oblasti zájmu i za účelem měření. Protože informace o teplotním

rozložení scény je získáváno z barevného spektra termogramu, bílá barva pozadí teplotních značek s černým ohraničením zanáší do přepočtu chybné údaje. Značky musí být detekovány a patřičně segmentovány. Otázkou vyvstává jak nahradit ztracené teplotní informace. Jedna z možností je z okolních bodů provést interpolaci, ale tím by bylo docíleno opětovného zkreslení měření bez uvědomění uživatele. Naopak by se eliminovala chyba při zobrazení diferencí a zvýrazněných hodnot nad teplotní mezí. Druhá varianta nahrazením oblastí barvou odpovídající teplotě pozadí. Tím se částečně eliminuje zkreslení maxima a minima. Danou teplotou disponuje samotné pozadí, a pokud se v něm nachází minimum, je pro nás nepodstatné. Naopak teplotní maximum bude určeno pouze v jednotkách pixelů mimo skutečné maximum. Navíc je v obraze jasně patrné, kde je dopouštěno ke zkreslení. V práci je zabýváno druhým případem, protože informace pod těmito oblastmi jsou ztracené a jakékoliv jejich nahrazení potažmo naprosté skrytí vede k dezinformaci. Uživatel má možnost v GUI značky skrýt nebo nechat zobrazovány.

Posledním problémem, se kterým nebylo v práci původně počítáno, je převod barev termogramu na teploty. Přímý převod z RGB modelu by bylo značně výkonově náročné a byla by znemožněna práce v reálném čase. RGB model je složen ze tří složek a jejich analýza je zdoluhavá. Naopak šedotónový obraz obsahuje pouze jednu složku. Z palet přístupných v termokameře je potřeba vybrat tu, která po převedení do šedotónového modelu splňuje lineární charakter s hodnotou intenzity 0 v počátku a 255 v maximu. Těmto požadavkům odpovídají dvě palety, gray a Iron. Pro lepší grafickou názornost byla vybrána paleta typu Iron. Lineární charakter je vyžadován pro vhodný převod na teplotní stupnici.



Obr. 21: Palety jednotlivých typů převedeny do šedotónového modelu

5.2 Aplikační cyklus

Hrubý vývojový algoritmus funkce aplikace je znázorněn na Obr. 22 a Obr. 23. Rozdělení do dvou algoritmů je z důvodu hlavní vykonávané smyčky uživatelského rozhraní, které provádí zpracovávající příkazů od uživatele a druhé části vykonávající příjem, zpracování, vyhodnocení a zobrazení dat po vyvolání přerušení od časovače.

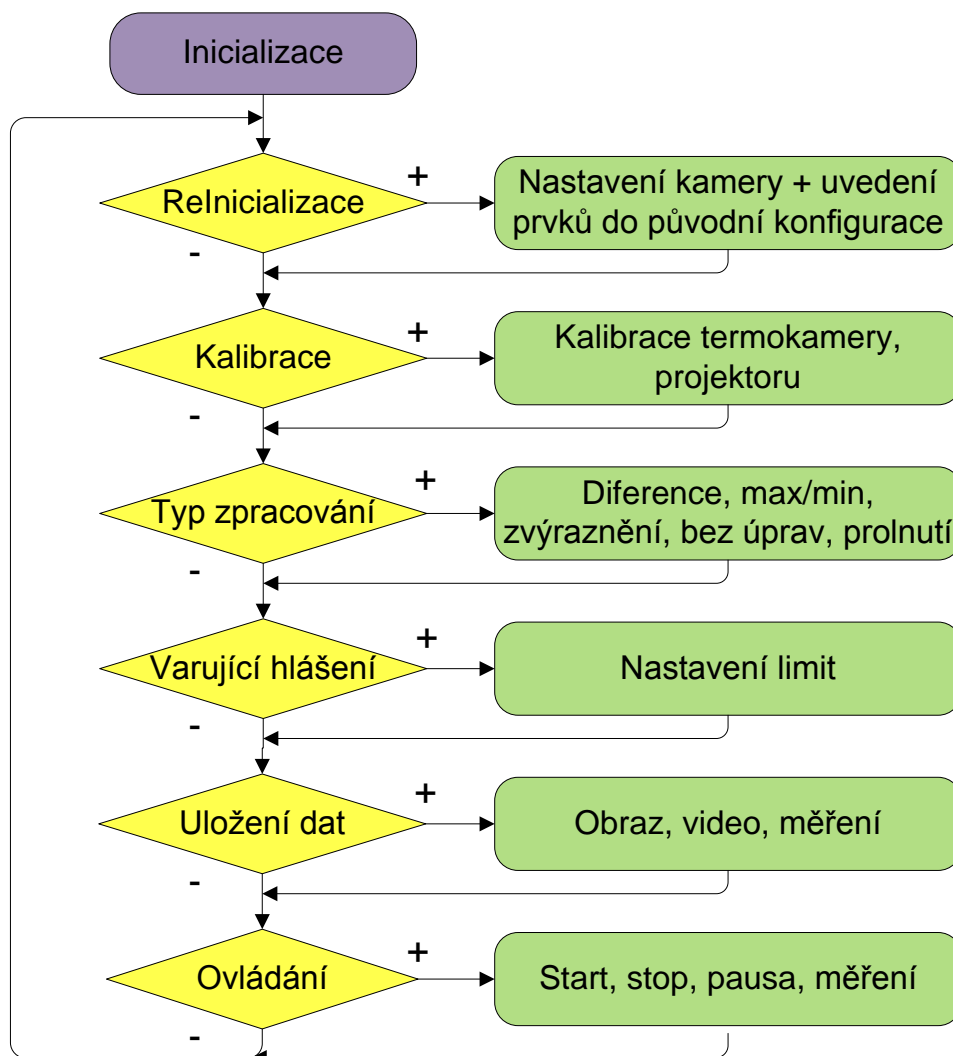
Obecně se daly zvážit tři možná řešení zpracování dat.

- V každém cyklu GUI
- Druhé vlákno
- Přerušení od časovače

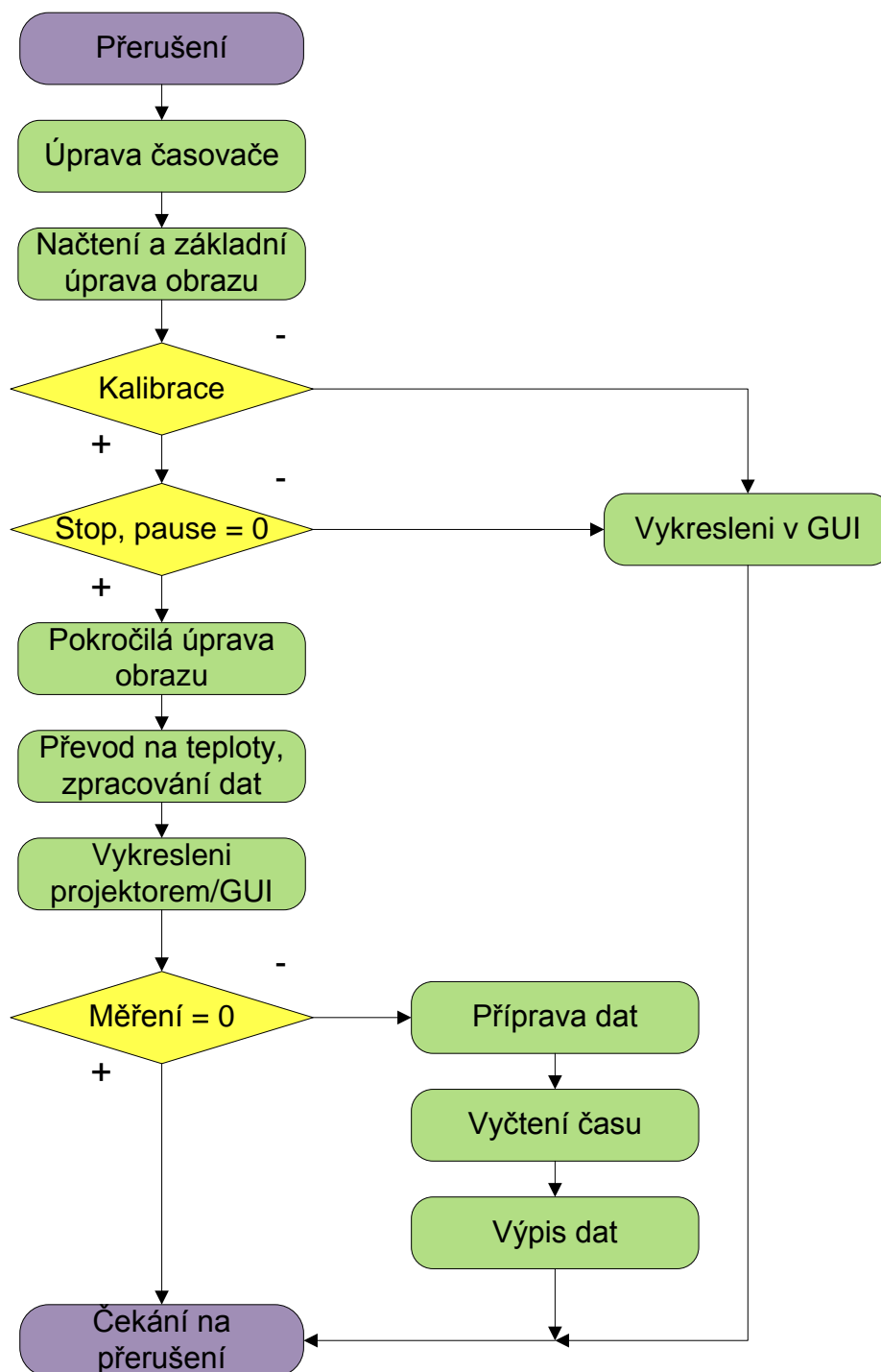
Obraz je potřeba zpracovat a následně promítnout do scény. Z hlediska fyziologie oka je nutné vykreslovat minimálně 25 obrazců za sekundu, aby promítaná data nepůsobila pro oko skokově ale spojitě. Provádět zpracování a vykreslení v každém cyklu aplikace je tedy zbytečně výkonově náročné a posléze by docházelo i k zpožděným reakcím na uživatelské příkazy. Samotné zpracování dat dle požadavků uživatele může trvat od desítek milisekund až k řádově stovkám milisekund.

Využitím druhého vlákna by došlo k eliminaci prodlev zadávaných příkazů uživatelem přes GUI, ale opět dochází k zpracování dat v těsném sledu. Tento stav vede k zbytečnému vytěžování procesoru, v případě jednoho jádra až k zpomalení celkové funkce PC. Problém by vyřešilo uspání daného procesu na vhodný čas, ale to bychom dosáhli obdobného výsledku jako s využitím přerušení od časovače.

Přerušení od časovače se ukázala jako nejvhodnější volba. Přerušení je nastaveno při inicializaci na 40ms (odpovídá 25 obrazcům za sekundu), v případě vyšších nároků na dobu zpracování dat dochází k adaptaci této hodnoty.



Obr. 22: Vývojový diagram uživatelského rozhraní



Obr. 23: Vývojový diagram zpracování termogramu

Při spuštění aplikace proběhne prvotní inicializaci, která se již opakovaně nevykonává, pouze na požadavek uživatele případnou reinicializací. Následuje čekání na požadavky od uživatele nebo s 40ms přerušovací periodou na vykreslení surových dat do GUI získaných z termokamery.

5.2.1 Popis vývojového algoritmu GUI

Inicializace

Jak již bylo zmíněno, inicializace se provádí po spuštění aplikace. Proběhne načtení připojené kamery. Pokud je připojených více kamer, je vybrána ta s nižším pořadovým číslem, případná změna kamery je možná re-inicializací. Nepřipojení kamery či komunikační problémy mají za následek vypsání chybové hlášky a je očekávaná opětovná inicializace. Při korektním načtení kamery jsou nastaveny všechny prvky v GUI na implicitní nastavení a aktivováno přerušení od časovače s periodou 40ms.

Re-Inicializace

Vykonává se obdobná rutina jako při samotné inicializace s tím rozdílem, že dochází k zastavení přerušení od časovače a dealokaci všech proměnných reprezentujících obrazová data s následným opětovným nastavením. Dealokace je potřebná k zamezení růstu využívané paměti a k inicializaci proměnných na novou velikost obrazu.

Kalibrace

Jedna z klíčových funkcí práce, probíhá provázání termokamery s projekčním zařízením. Kalibraci lze provádět opakovaně, takže je potřeba vždy dealokovat proměnné reprezentující obraz, ze stejných důvodů jak bylo popsáno v re-inicializaci. Pokud byla provedena inicializace kamery, přistoupí se k samotné kalibraci. Nejprve je vykonána kalibrace projektoru. Následuje kalibrace termokamery, která je komplikována výskytem teplotních značek v termogramu. Pro kalibraci termokamery jsou nevhodné, protože překrývají kalibrační značky, musí být detekovány a segmentovány.

Získané poziční body z kalibrace projektoru a z termokamery jsou využity k výpočtu transformační matice na změnu perspektivy. Tento výpočet se provede pouze v kalibraci a výsledné hodnoty jsou uloženy a využívány na každý získaný frame během měření. Pokud dojde k posunu termokamery, projektoru nebo měřeného objektu musí být opětovně provedena kalibrace.

Součástí kalibrace je kontrola zvolené palety v termogramu. Korektní je pouze paleta typu Iron případně šedotónová paleta. Kontrola je provedena načtením vzorové palety a jejím porovnáním s vyčtenou z termogramu. Stupnice v termogramu má vždy totožnou pozici, která je nám známa. Není potřeba složitých algoritmů k její detekci. V případě korektní i nekorektní detekce je získaná paleta zobrazena uživateli v GUI a následně i informace o proběhlém procesu.

Úspěšná kalibrace znamená korektní proběhnutí všech zmíněných kroků. Následně jsou zpřístupněny všechny funkce v uživatelském rozhraní a vytvořena promítací rovina ve scéně. Závěrem proběhne uložení barevného spektra reprezentujícího teplotní informaci pozadí, která je využívána při maskování teplotních značek v termogramu.

Zpracování teplotních informací

Na výběr jsou tři respektive čtyři možná zpracování. `Basic_display`, `difference`, `max/min`, `Temperature_limit`. Výběrem je nastaven vhodný parametr zajišťující provedení korektního zpracování obrazu ve funkci přerušení od časovače (vyhodnocení, zpracování, zobrazení). Jednotlivé nastavované kroky jsou vypisovány v uživatelském rozhraní.

Uložení dat

K dispozici jsou tři možnosti uložení dat. Uložení obrazu, videa a měřených dat. Každý typ uložení je tvořena funkcí s patřičným algoritmem. Spuštění programu vede k inicializaci proměnných zajišťujících čítání počtu uložených souborů na hodnotu 0. Každý úkon neboli typ uložení má vlastní čítač reprezentující taktéž název souboru. Během ukládání je spojen číselný údaj s koncovkou `.jpg/.avi/.txt`. Název souboru s informací o stavu provedené operace je opět vypsán v uživatelském rozhraní.

Uložení termogramu je realizováno funkcí `cvSaveImage` přijímající název proměnné, v tomto případě spojení údaje z čítače s koncovkou `.jpg`, a obrazová data. Čítač je posléze navýšen pro případné uložení dalšího termogramu.

Ukládání videa je komplikovanější oproti obrazu, protože je potřeba kontrolovat zda je soubor již otevřen a dochází k zápisu, nebo je zápis možné provádět. Rutina ukládání videa je využita z knihovny `openCV`, funkce `cvWriteFrame`, během procesu uložení je otevřeno dialogové okno s možností nastavení parametrů videa včetně výběru kodeku ke kompresi videa.

Uložení měření je realizováno tradiční cestou otevřením textového souboru a cyklickým zápisem všech položek obsažených v komponentě typu `list` v uživatelském rozhraní. Jednotlivé položky jsou vždy odřádkovány kvůli jejich přehlednosti při případném následném zpracovávání.

Ovládání

K ovládání běhu zobrazení jsou k dispozici tři parametry (`start`, `stop` a `pauze`) řízené z uživatelského rozhraní. `Stop` a `pauza` vedou k zastavení promítaného obrazu, přičemž funkce `stop` je silnějšího charakteru, dochází i k odstranění promítaného obrazce ze scény.

Tlačítko `Pauza` nastaví odpovídající parametr na hodnotu `true`, čímž je zamezeno aktualizování promítaného frame. `Pauze` je nadřazeno tlačítko `Stop`, které lze užít i v okamžiku pauzy, obrácené pořadí není možné. V případě `Stop` je vytvořen černý obraz, který je následně promítán. Uvedení aplikace do aktivního stavu uskutečňuje tlačítko `Start`, kterým je shozen stav `pauza/stop`.

5.2.2 Popis vývojového algoritmu přerušení

Přerušení od časovače je nastaveno během prvotní inicializace aplikace na časovou periodu 40ms. Perioda je však adaptována za běhu programu s ohledem na dobu trvání vykonávání přerušení. Dobra zpracování funkce vykonávána během přerušení je měřena a z posledních 100 hodnot vyhodnocována nová vhodná doba periody. Vypočtená perioda neodpovídá průměrné hodnotě, ale je zavedena hystereze, která zamezuje neustálému adaptování.

Z termokamery je načten frame a případně dochází ke skrytí značek, podle volby uživatele. V této části může docházet k třem případům, nebyla provedena kalibrace, kalibrace byla provedena, ale aplikace se nachází ve stavu stop nebo pauza a aktivní běh aplikace. První dva případy vedou k procesu pouhého vykreslení obrazu v uživatelském rozhraní bez jakýchkoliv úprav.

Aktivní běh aplikace vyžaduje předúpravu obrazu v podobě odstranění části s paletní stupnicí. Stupnice je vždy umístěna na stejné známé pozici v termogramu. K jejímu odstranění není potřeba složitých algoritmů, souřadnice jsou zadány přímo, čímž je také značně ušetřen strojový čas. Aplikuje se vypočtená transformační matice na změnu perspektivy a vzájemné provázání bodů z termogramu a kalibračních bodů z projektoru. Transformací mohou vzniknout na okrajích snímku oblasti s nulovou hodnotou, vliv lineárního zkosení stran obrazce při změně perspektivy. Zmíněné oblasti budou konstantní pro všechny transformované frame. S prvním frame je vypočtena maska nahrazující nulové oblasti barvou odpovídající teplotě pozadí a následně proveden převod do šedotónového modelu. Nově načtené framy jsou již pouze násobeny vypočtenou maskou, a tím opět dochází k snížení nároků na strojový čas. Termogram v šedotónovém modelu je přepočten na teplotní informace na základě teplotního rozsahu v termokameře. Tento údaj je získán od uživatele. Typ zpracování dat v podobě termogramu se odvíjí od nastavení uživatelského rozhraní vytvořenou rutinou k výběru vhodné funkce.

Pokud je zaslán požadavek k provedení měření, jsou data o maximu, minimu a průměru předzpracována již při převodu do šedotónové modelu, ale vyhodnocována až v samotném závěru přerušení. Předzpracování je prováděno dopředu z důvodu využívání údajů o maximu a minimu i ke grafickým úpravám. Pokud není zadán požadavek na provedení měření, je využívána funkce méně časově náročná. Měření obsahuje i výpis časového razítka, které se spuštěním měření nuluje, tzn. každé nové měření je časováno od počátku 00:00:00s.

5.3 Funkce třídy thermocamera

Vytvořená třída `thermocamera` disponuje celkem 18 funkcemi k zpracování informací. Většina je používána jako součást globálnějších funkcí, ale jejich samotné využití je rovněž možné. Realizující například ořezání obrazu dle zadaných vstupních

parametrů, vyplnění oblastí, seřazení pozic označených v obrazci atd. Výčet funkcí tvořící třídu thermocamera:

```
private:
    void filling(IplImage* image, int x, int y, int &area,
        vector<CvRect> &all_area_data);
    int regions(IplImage* brand_binar);
    void cursor_resolution(void);
    void sort_brands(vector<CvPoint> &input_calib_data);
    void temperature_display(double max, double min);
public:
    void Calibration_thermocamera(void);
    void Calibration_projector(void);
    void perspective_transform(void);
    IplImage* crop(IplImage* src, CvRect roi);
    void paint(CDC *pDC, double max, double min);
    void imageToBitmap(IplImage *frame, CvSize size_dst, CDC *pDC);
    void pixels_to_grayscale(void);
    void grayscale_to_temperature(int mode, double max, double min);
    void draw_cross_max_min(void);
    void difference(int mode, int level);
    double temperature_limit(int temp);
    void display_warning(int mode);
    void clear_image(int flag);
```

Obecný popis pomocných funkcí:

Podrobnější popis je zakomponován ve výčtu jim nadřazených funkcí.

Filling – semínkové vyplnění se spojením oddělených oblastí v rámci hystereze závislé na velikosti použitého rozlišení (kalibrace)

Regions – vyhledání kalibračních bodů v obraze a nalezení jejich středu (kalibrace)

cursor_resolution – detekce a uložení kalibračních bodů označených uživatelem ve scéně (kalibrace)

sort_brands – seřazení kalibračních souřadnic do známého tvaru, neboli přizpůsobení k provázání kalibračních bodů termokamery a projektoru (kalibrace)

crop – ořezání vstupního obrazce dle zadaných souřadnic

imageToBitmap – převedení obrazce IplImage na bitmapu, pro zobrazení v GUI

pixels_to_grayscale – převod termogramu na stupně šedi + korekce černých oblastí po perspektivní transformaci

grayscale_to_temperature – převod obrazu ze stupně šedi na teplotní informace

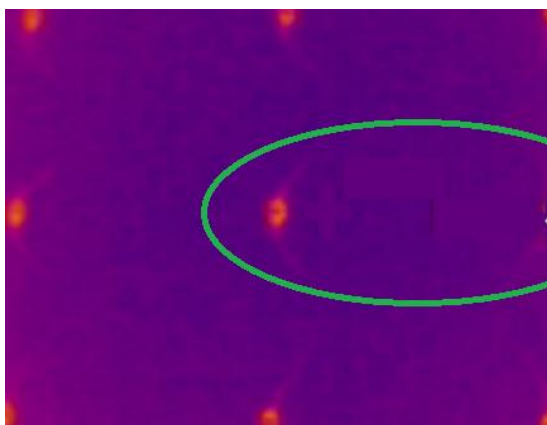
paint – vykreslení obrazu do scény + v uživatelském rozhraní

temperature_limit – realizuje varující hlášení při překročení limit

5.3.1 Kalibrace termokamery

`Calibration_thermocamera`

Kalibrace termokamery značená funkcí `Calibration_thermocamera` vede k vyhledání tepelných značek v obraze. Kalibrační deska má poměr stran 4:3 stejně jako rozlišení termokamery. Tento poměr byl zvolen k využití co největšího plochy termogramu k měření. Při kalibraci nám v obraze cloní významná data teplotní značky. Proto jsou nejprve vyhledány a zamaskovány teplotou pozadí. Navíc dynamicky se pohybující hledání maxima, u kterého je jisté, že bude umístěno na kalibrační značce, musí být nejen zamaskováno, ale i upraveno, aby byl obnoven kalibrační bod. Toho je docíleno vložením bílého kosočtverce namísto značky ve tvaru kříže. Středová nepohyblivá značka je pouze zamaskována. Termogram je ořezáván o paletovou stupnici, dochází k zmenšení šířky, a tím také k vychýlení středové kalibrační značky ze středové teplotní značky, proto není potřebná obnova dat. Po předzpracování obrazu je provedena detekce kalibračních značek.

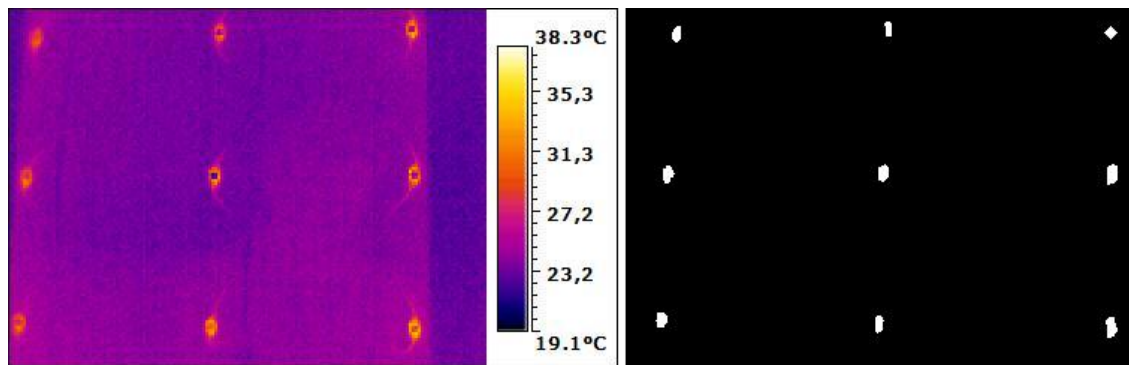


Obr. 24: Skrytí teplotních značek při kalibraci

Vstupní obraz je převeden do stupňů šedi, v níž jsou hledány prvky s maximální intenzitou. Nalezená hodnota je snížena o 5% a je použita jako parametr pro binarizaci obrazu. K snížení hodnoty intenzity dochází z důvodu vyhledání nejen jednotlivých pixelů s maximální hodnotou, ale k vyhledání všech oblastí reprezentovaných kalibračními body. Následnou dilatací a erozí čtvercovým tvarem je dosaženo spojení blízkých pixelů tvořící oblast kalibračního bodu. Metodou semínkového vyplňování jsou od sebe odlišeny jednotlivé kalibrační body a je určen celkový jejich počet a pozice v obraze. Pokud počet kalibračních bodů je menší než počet skutečných bodů, dochází ke snížení levelu binarizace opět o 5% a celý proces se opakuje.

Na obr. 25 je ukázka vyhledání kalibračních bodů, které jsou realizovány výkonovými led diodami. V obrazci napravo se jedná o vyplněné oblasti (semínkovou metodou) a jejich pozice je určena středovým pixelem. Knihovna openCV neobsahuje vhodnou metodu pro vyplnění/identifikaci oblastí dle našich potřeb, proto byla realizována vlastní semínková metoda. Jedná se o jednoduchou, ale pomalou metodu

v případě velkých ploch. Metoda je využita pouze ke kalibraci, kde vyhledávané plochy dosahují maximálně jednotek či desítek pixelů. Pro tyto účely je metoda semínkového vyplnění silně dostačující.



Obr. 25: Testovací obraz kalibračních značek a jejich vyhledání

Algoritmus semínkového vyplnění:

Algoritmus spočívá v řádkovém prohledávání obrazu, dokud nedojde k nalezení bodu odlišného od pozadí a „zasazení“ semínka. Daný bod je označen a prohledány všechny okolní body (8 směrů). Pokud jsou odlišné od pozadí, dojde k označení a zařazení do FIFO fronty. Z fronty jsou prvky opět vybírány a kontrolováno jejich okolí, při splnění podmínek korektnosti jsou nové prvky opět označeny a vkládány do fronty. Takovým algoritmem se kruhově označí celá oblast. Řádkové prohledávání obrazu dále vyhledává odlišný bod nejen od pozadí, ale i od již použitého značení. Po dokončení algoritmu je určena pozice jednotlivých oblastí středovým pixelem.[2]

Při vyšším rozlišení může docházet k rozpadu značky na více oblastí. Tento problém je řešen vymezením pásma kolem nalezené oblasti. Pásmem je definovaná mez, ve které nemůže ležet jiný kalibrující bod (dáno z uspořádání značek ve scéně). Všechny nalezené oblasti v tomto pásmu reprezentují jednu značku a dochází k jejich spojení.

5.3.2 Kalibrace projekčního zařízení

`Calibration_thermocamera`

Funkce kalibrace projekčního zařízení je volána v kalibrační rutině jako první. Při promítání termogramu do scény požadujeme, aby projekce probíhala jen v kalibrované oblasti a nedocházelo k promítání nevhodných informací z operačního systému. Vytváří se full screen promítací okno s promítaným obrazem odpovídajícím rozlišení projekčního zařízení o nulové intenzitě (černá barva). Kalibrované termogramy jsou posléze vkládány do vytvořeného obrazce na pozici vyhrazenou při kalibraci popsané dále.

Samotná kalibrace spočívá v označení kalibračních značek ve scéně za pomoci projektoru. Označení provede uživatel kurzorem myši, kdy jednotlivé značky označí

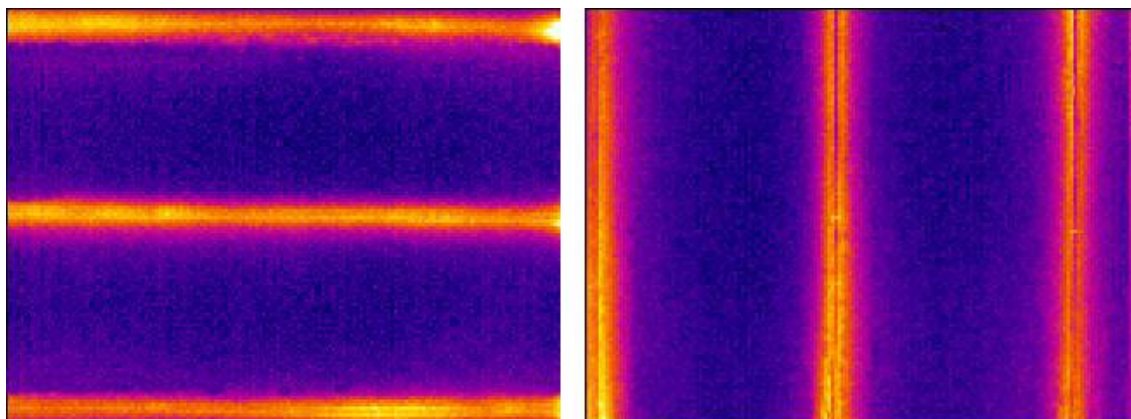
stiskem pravého tlačítka. Získané pozice jsou vkládány do vektoru typu `CvPoint`. Stisk pravého tlačítka je kontrolováno windows funkcí `GetAsyncKeyState(VK_RBUTTON)`, která při stisku vrací hodnotu 1. Ošetření označení jednoho bodu několikrát dlouhým stiskem je realizováno uspáním procesu na 300ms mezi každým dalším zpracovávaným stiskem. Po označení všech 9 bodů je vypočtena kalibrovaná oblast a uloženy její souřadnice. Na danou oblast se posléze budou resizingovat všechny frame z videa. Pokud jsou k dispozici i kalibrační body od termokamery, přejde se k výpočtu perspektivní transformační matice.

5.3.3 Transformace obrazu

`perspective_transform`

Při uvedení měřicího systému do provozu nebo při změně polohy jednotlivých zařízení je potřeba provést vzájemnou kalibraci přístrojů. Během kalibrace dochází rovněž k analýze perspektivního zkreslení vznikajícího snímáním scény z určitého neznámého úhlu. Pokud je zkreslení odhaleno proběhne výpočet transformační matice, která je následně aplikována na data přijímaná během měření.

Kromě změny perspektivy je také potřeba zhodnotit zkreslení objektivu. Použití objektivu vnáší do pořízeného snímku vždy určité zkreslení. Je na zvážení, zda je pro dané účely zkreslení zanedbatelné, nebo musí být redukováno. Stejně tak je tomu i u termokamery, před čipem je rovněž umístěn objektiv. Měření zkreslení bylo provedeno nahřáním tvrzeného drátu a jeho umístění do tří pozic, okrajů a středu pořízeného snímku. Největší zkreslení je vázáno s okrajem snímku (poduška, soudek).



Obr. 26: Měření zkreslení objektivu

Zkreslení objektivu termokamery je pro naše účely možné zanedbat, jak lze vidět z provedeného měření na obr. 26. Jediná transformace obrazu je tedy ve smyslu změny perspektivy, a tím i k mapování bodů nalezených v termosnímku a získaných kalibrací projektoru.

Před vlastním výpočtem transformační matice je potřeba získané body seřadit do známé posloupnosti. Tím se eliminuje požadavek na uživatele označovat body ve scéně

dle určité posloupnosti. Samotný výpočet transformační matice je dle kapitoly 4.4 Rektifikace. Výsledná matice je uložena a využívána ke změně perspektivy každého frame. Realizována je zpětná transformace, aby bylo zamezeno vzniku děr v obraze. Výsledný obraz je získán openCV funkcí `cvWarpPerspective`. Parametry funkce jsou vstupní obraz, výstupní obraz, transformační matice a příznak na přímou nebo zpětnou transformaci. Samotný výpočet není složité realizovat, ale vzhledem k ušetření strojového času byla využita funkce z knihovny openCV.

5.3.4 Segmentace teplotních značek

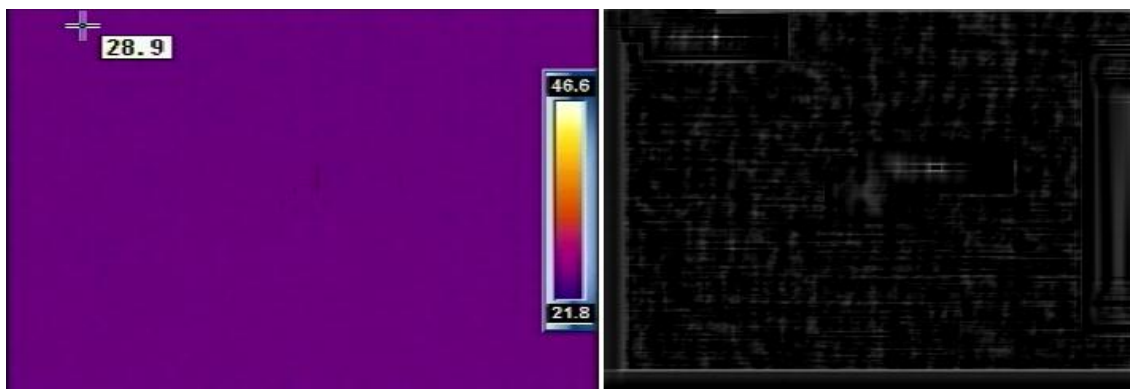
Jak již bylo zmíněno v termogramu načteném z termokamery přes analogový výstup, se vyskytují značky skrývající teplotní informace. Funkce `clear_image` přijímá pouze jediný parametr vystihující mód, ve kterém bude pracovat. Pokud se příznak `flag` rovná 1, dojde ke skrytí značek a k obnově kalibračního bodu skrytého pod dynamickou značkou. Daný mód se využívá pouze při kalibraci. Jiná hodnota příznaku `flag` má za následek pouhé skrytí značek.



Obr. 27: Vzory hledané v obraze

Středová statická značka není v obraze vyhledávána, ale segmentována na základě známé a neměnné pozici. Dochází k vykreslení kříže a obdélníku na požadovaných pozicích barvou odpovídající teplotní hodnotě pozadí. Dynamická značka označující maximum v termogramu je vyhledávána na základě vzorových obrázků znázorněných na obr. 27.

Obraz je převeden do 8 bit stupni šedi a vyprahován k potlačení okolí kolem kříže. Kříž a teplotní údaj disponují specifickým tvarem, který se běžně v termogramu nevyskytuje, k jejich detekci lze využít předdefinované vzory. Pomocí funkce `cvMatchTemplate` je vyhledán nejprve teplotní údaj v rámečku. Jeho detekce je kvůli absenci pozadí jednodušší, není ve vzoru obsažena jiná informace než oblast zájmu. Detekce kříže je komplikována proměnným pozadím. Pokud se nachází na barvách odpovídajícím nízkým teplotám, je kříž v černém poli orámován bílou konturou. V případě výskytu ve vyšších teplotách, je kříž v bílém poli. Proto také dva typy vzorů, jestliže není vzoru nalezena odpovídající oblast, je hledán druhý vzor s odlišným pozadím. Pokud souhlasná oblast také není nalezena, může docházet k překrytí středovou značkou a segmentace není provedena.



Obr. 28: Detekce značky s teplotním údajem

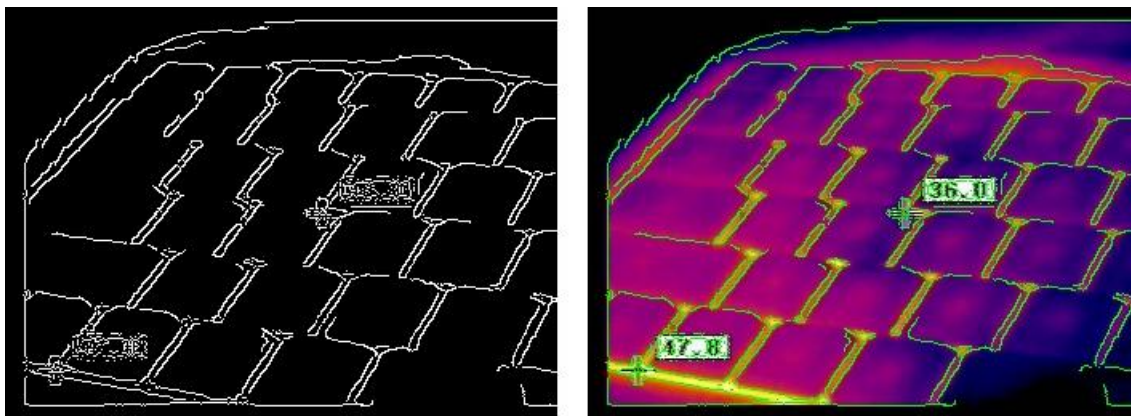
Funkce `cvMatchTemplate` přijímá celkem 4 parametry, vstupní obraz, hledaný vzor, výstupní obraz a metodu, jakou bude vzor v obraze vyhledáván a reprezentován. Nalezené maximum ve výstupním obraze odpovídá počátečnímu bodu hledané oblasti. Intenzita maxima lze interpretovat jako míra shody, na základě které se určuje, zda bylo rozpoznání korektní nebo se využije druhého předkládaného vzoru.

5.3.5 Zpracování obrazu

K dispozici jsou čtyři možné úpravy obrazu (diference, zvýraznění teplot na zvolenou mezí, maximum/minimum, zobrazení teploty určitého bodu s označením a výpisem do scény). Jedná se o grafické úpravy obrazu, textovým zpracováním a ukládáním se v popisovaném nezaobírá. Jejich popis vystihuje kapitola 5.2.1 Popis vývojového algoritmu GUI.

Zvýraznění diferencí (difference)

Funkce přijímá dva parametry, mód zpracování (mode) a intenzitu hledání diferencí (level). Mód roven 0 vede k zobrazení pouze diferencí, mód roven 1 zobrazí smíšený obraz termogramu a zvýrazněných diferencí. Samotné vyhledání diferencí probíhá hanovacím algoritmem typu Canny. Opět z důvodu ušetření strojového času je využita openCV funkce `cvCanny` přijímající 5 parametrů, vstupní obraz, výstupní obraz, spodní práh, horní práh a velikost matice filtru typu Sobel. Prahy jsou přiřazovány na základě vstupního parametru level, výběr se provádí z 5 předdefinovaných intenzit. Matice sobel filtru je volena na rozměr 7x7. Canny algoritmus vede nejprve k eliminaci šumu v obraze a následně k detekci gradientu. Nižší práh je použit k propojení stěžejních segmentů hran nalezených pomocí horní hranice prahu.



Obr. 29: Vyhledání a zvýraznění diferencí

Hranování je provedeno na obraze ve stupních šedi. K zvýraznění diferencí byla zvolena zelená barva tedy v RGB modelu hodnota 0;255;0. Pro získání barevného modelu je potřeba sloučit tři obrazy ve stupních šedi do jednoho obrazu v RGB modelu. Každý ze tří obrazů reprezentují jednu složku modelu. Pro pouhé zvýraznění diferencí stačí sloučit dva obrazce ve stupních šedi inicializované na hodnotu 0 a výstupního obrazu z hranování. Ke sloučení se využívá funkce z openCV `cvMerge` přijímající jako parametr jednotlivé samostatné složky, které mají být sloučeny (typu 8 bit, 1 kanál) a výstupní obraz v barevném modelu (typu 8bit, 3kanály).

Smíšení termogramu se zvýrazněnými diferencemi vyžaduje několik úprav v samotných složkách R, B a G termogramu. Termogram je rozdělen (`cvSplit`) na jednotlivé složky, u G složky potřebujeme zanechat všechna data vyjmo bodů, kde se nachází difference, v nich je třeba navýšit intenzitu na maximum (255). Naopak složky R a B vyžadují opačný zásah, hodnoty v bodech výskytu difference je potřeba redukovat na 0 při zachování všech ostatních informací. Úprava G složky vyžaduje součet s obrazem obsahující difference. V místech diferencí je hodnota bodů zvýšena na úroveň 255 (nedochází k přetečení), v ostatních bodech jsou data nezměněna. Následně se invertuje obraz s diferencemi a binarizuje se. Výsledná data jsou reprezentována hodnotou 0 v oblasti výskytu diferencí a 1 v ostatních částech obrazu. Takto upraveným obrazem se provede násobení se složkou R a B. Opětovné sloučení složek vede k zvýraznění difference reprezentovanou zelenou barvou o hodnotě 0;255;0 (R,G,B) při zachování ostatních informací v termogramu.

Zobrazení maxima/minima (`draw_cross_max_min`)

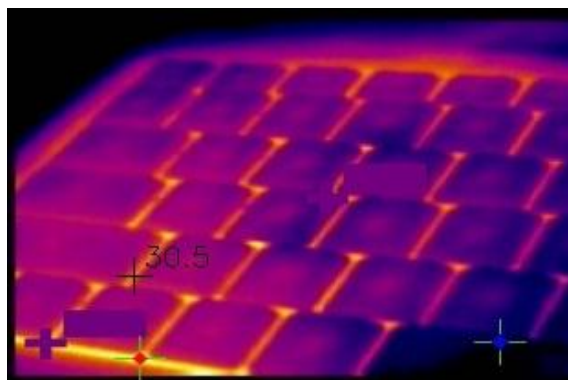
Funkce hledá pozici maxima a minima včetně jejich hodnoty s následným označením ve scéně a výpisem teploty v GUI. Stupnice palety Iron má po převodu do stupni šedi lineární charakter s intenzitou v počátku 0 a v maximum 255, toho lze vhodně využít k převodu na teplotní údaj. Známe-li maximum a minimum nastavené v termokameře, vypočteme teplotu odpovídající jednomu bodu intenzity s následným lineárním proložením palety.

$$t_{krok} = \frac{\max - \min}{255} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (15)$$

Vyhledání souřadnic včetně hodnoty maxima i minima je provedeno openCV funkcí `cvMinMaxLoc`. Samotné vyznačení maxima/minima ve scéně je provedeno křížem s barevným rozpoznáním v podobě červeného (maximum)/modrého (minimum) kosočtverce v jeho středu. Při vykreslování označení je kontrolována pozice, zda nezasahuje značka i mimo obraz, a tím nemohlo dojít k pokusu o zápis mimo alokovanou paměť.

Zobrazení teploty v určitém bodu scény (`temperature_display`)

Vykresluje hodnotu teploty v označeném místě ve scéně. Značení je provedeno pravým kliknutím přímo v bodě, který je oblastí zájmu. Deaktivace vykreslení je možná označením prostoru mimo kalibrovanou plochu nebo oblasti s nulovou informační hodnotou. Funkce využívá převedení barevného termogramu na teploty popsáno ve funkci `draw_cross_max_min` a vyčtení pozice kursoru myši při označení je obdobné jak při kalibraci projekčního zařízení.



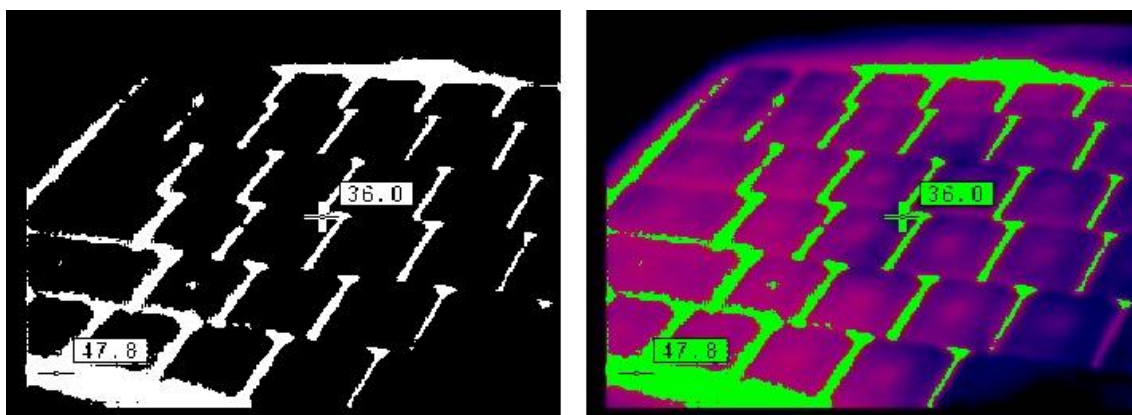
Obr. 30: Vyhledání max/min a zobrazení teploty v bodě

Označení je pouze jednorázový proces, proto je nejprve pozice vyhodnocena, zda není mimo kalibrovaný prostor a jestli nese informační hodnotu. Pokud jsou požadavky splněny, dojde k uložení pozice a na daném místě k vykreslení označení a výpisu teplotní informace. Při každém dalším frame je tento údaj do něj zanesen až do doby deaktivace zobrazení nebo změny oblasti zájmu.

Zvýraznění teplot nad zadanou mezí (`display_warning`)

Funkce je úzce spjata s funkcí `temperature_limit`, neboť dochází k zvýraznění teplot nad zadanou teplotní mezí. Funkce lze spolu kombinovat. Pokud dojde k výskytu varovné hlášky o překročení nastavené limity, můžou být oblasti překračující tuto mez graficky zvýrazněny. Primárně jsou tyto funkce zcela samostatné a lze jim nastavit vzájemně jiné teplotní limity. `temperature_limit` je vyloženo informačního

charakteru, uživatele upozorňuje textovým výpisem, `display_warning` zvýrazňuje teploty nad zadanou mezí.



Obr. 31: Vyhledání a zvýraznění teplot nad zvolenou mezí

K zvýraznění jsou využity opět vypočtené teplotní údaje popsané ve funkci `draw_cross_max_min`, které jsou prahovány s nastaveným prahem odpovídající mezní teplotě. Zvýraznění je opět v podobě zelené barvy 0;255;0 (R, G, B), tudíž vyprahovaný obraz tvoří přímo G složku. Smíšení obrazu s termogramem je realizováno obdobným algoritmem jako ve funkci zvýraznění diferencí.

6 UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ (GUI)

Pro ovládání měřicího systému je realizováno uživatelské rozhraní v aplikaci MFC. Disponuje ovládacími prvky, prvky grafického charakteru k zvýraznění informací v termogramu, ukládání informací, měřením a informačním systémem o stavu aplikace. Během spuštění aplikace je načtena kamera a zahájeno zobrazování dat v GUI, na tento obraz nejsou aplikovány žádné úpravy kromě skrytí teplotních značek. Zobrazován je účelně surový obraz pořízený z termokamery, pro lepší informační charakter o zabírané scéně a potažmo k možnosti nastavení termokamery. Na kalibrovaném a ořezaném promítaném obrazci nemusí být viditelné nastavovací prvky termokamery.

6.1 Popis prvků GUI

Camera

Při špatné inicializaci kamery nebo v případě více připojených kamer je provedena opětovná inicializace.

Calibrate

Pokud inicializace kamery proběhla v pořádku, aplikace vyčkává na provedení kalibrace. Do doby než je provedena kalibrace, není zpřístupněna žádná funkce kromě zobrazování dat z termokamery v GUI. Během kalibrace je potřeba, aby uživatel pomocí myši označil pravým kliknutím všechny kalibrační značky ve scéně (v libovolném pořadí). Korektní provedení kalibrace aktivuje promítání termogramů do scény a je vypsána zpráva v informačním okně.

Start,Stop,Pause

Zastavení promítání dat (vykreslena je pouze černá plocha – tzn. nepromítána žádná data), pozastavení obrazu, obnova promítání dat.

Save image, video a data

Image – aktuální frame je uložen do složky s aplikací. Název souboru odpovídá pořadovému číslu uložení s koncovkou .jpg.

Video – stejně jako výše zmíněny Image s rozdílem možnosti nastavení parametrů videa. Při požadavku na uložení videa dojde k otevření okna s parametry ohledně kodeku, počtu framů za jednotku sekundy a podobně. Nastavovací okno s parametry videa není náplní této práce, ale jedná se o využití funkce z knihovny openCV.

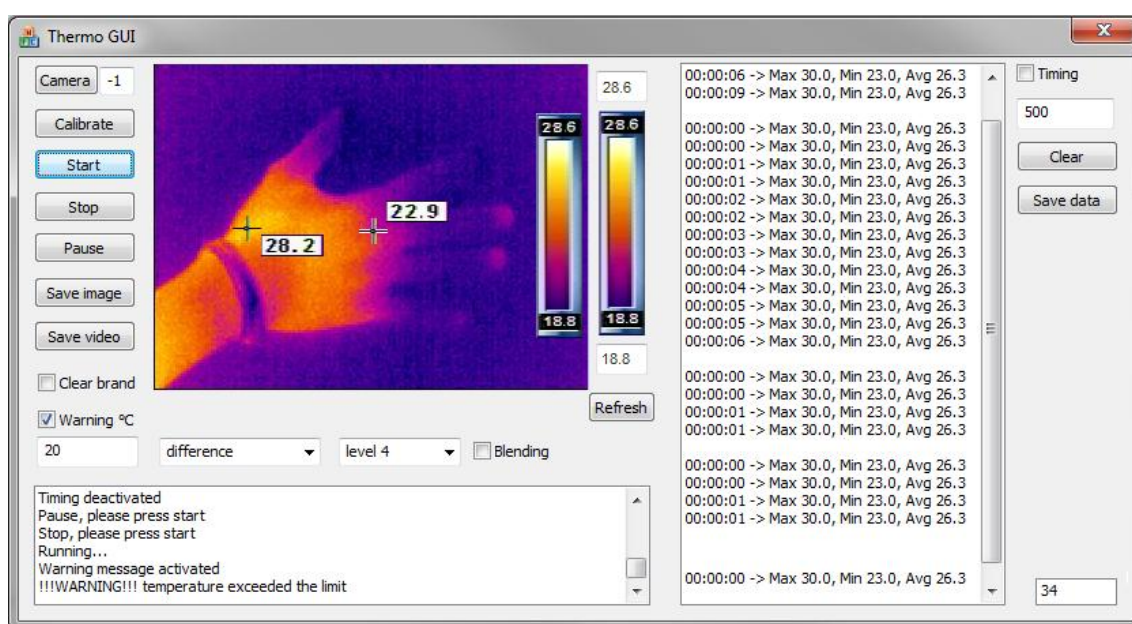
Data – Proběhlé měření je uloženo do textového souboru .txt.

Clear brand

Proběhne vyhledání a segmentování teplotních značek v termogramu. Operace je značně výkonnostně náročná a může docházet k rapidnímu nárůstu času k zpracování termogramu. Pozice značek je nahrazena barvou odpovídající teplotě pozadí bez měřeného objektu. Doporučuje se aktivace této funkce při využívání vyhledání maxima/minima v obraze.

Warning

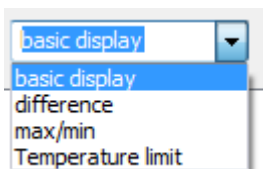
Aktivací se hlídá maximální teplota vyskytující se v termogramu. Pokud bude překročena stanovená mez, dochází k výpisu varujícího hlášení v informačním panelu.



Obr. 32: Uživatelské rozhraní

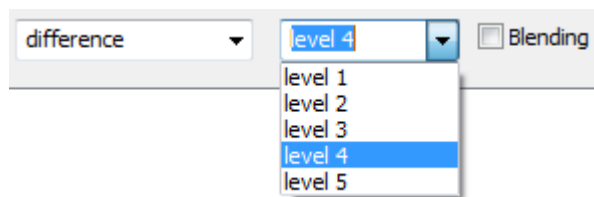
Grafické zpracování termogramu

Basic_display jedná se o základní vyobrazení bez provedení úprav. Jednotlivé frame z termokamery jsou pouze perspektivně transformovány a vyobrazeny.



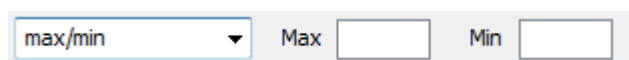
Obr. 33: Výběr typu zpracování

Difference funkce zobrazující náhlé teplotní přechody. Zpřístupňuje se nastavení v podobě výběru pěti možných intenzit detekce a dále možnost prolnutí zvýrazněných oblastí se základním vyobrazením.



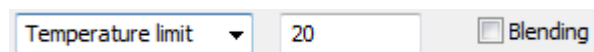
Obr. 34: Nastavení diferencí

Max/min vyhledává maximální a minimální teplotu v obrazci. V uživatelském rozhraní jsou následně zobrazeny jejich hodnoty. Tato funkce je doporučena kombinovat s maskováním teplotních značek v termogramu, jinak dochází ke zkreslení určení polohy maxima/minima a jejich hodnot.



Obr. 35: Nabídka maximum/minimum

temperature_limit zvýrazní teploty v termogramu nad stanovenou mezí. Promítaná data mohou obsahovat pouze zvýrazněná místa nebo provést prolnutí s původním termogram stejně jako u funkce difference.



Obr. 36: Nastavení zobrazení oblastí nad mezní teplotou

Měření

Aktivace Timing spustí měření minimální, maximální a průměrné hodnoty termogramu v zadané vzorkovací periodě. Vyčtená data jsou vypisována ve svislém informačním panelu. Každý údaj je opatřen časovým razítkem, kdy každé započaté měření je vztaženo k počátečnímu času tedy 00:00:00s. Při ukončení měření a opětovném spuštění dojde k oddělení jednotlivých měření volným řádkem. V případě uložení je toto rozdělení dodrženo i v textovém souboru. Vymazání měření lze provést tlačítkem clear.

Refresh

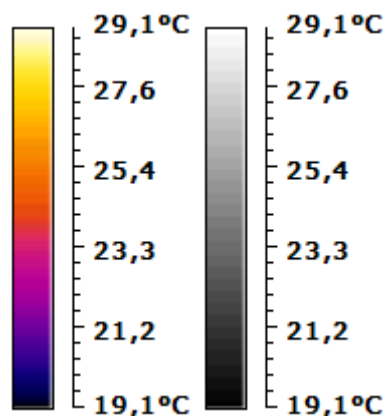
Nastavená paleta v termokameře je kontrolována při kalibraci. Případná opětovná kontrola lze provést tlačítkem refresh. V GUI musí být také zaručeno korektního nastavení teplotního rozsahu použitého v termokameře.

6.2 Shrnutí funkce

- Sledování „pohled termokamery“ v uživatelském rozhraní
- Kalibrace projektoru + termokamery
- Sledování změny teplot ve scéně v reálném čase
- Zvýraznění důležitých informací v termogramu (diference, max/min, oblasti nad teplotní mezí)
- Prolnutí zvýrazněných dat se základním termogramem
- Varující hlášení při překročení nastavené teplotní limity
- Skrytí teplotních značek
- Zastavení promítání (pause)/vypnutí promítání (stop)
- Měření maximální, minimální a průměrné hodnoty v termogramu s možností nastavení vzorkovací periody, vymazání měření
- Uložení obrazu (.jpg), videa (.avi) a měření (.txt)
- Výpis doby zpracování jednoho snímku
- Systém hlášení o stavu aplikace

7 ANALÝZA MĚŘENÍ

Analogový výstup vede ke ztrátě teplotní informace v jednotlivých obrazových bodech, které jsou k dispozici v digitálním formátu. Ztrátou informace se komplikuje následná analýza. Jednotlivé teploty musí být softwarově přiřazeny upravené paletové stupnici. Navíc použitá paleta může být pouze typu Iron, jinak není přiřazení teplot korespondující se skutečností.



Obr, 37: Teplotní rozsah termovizní kamery

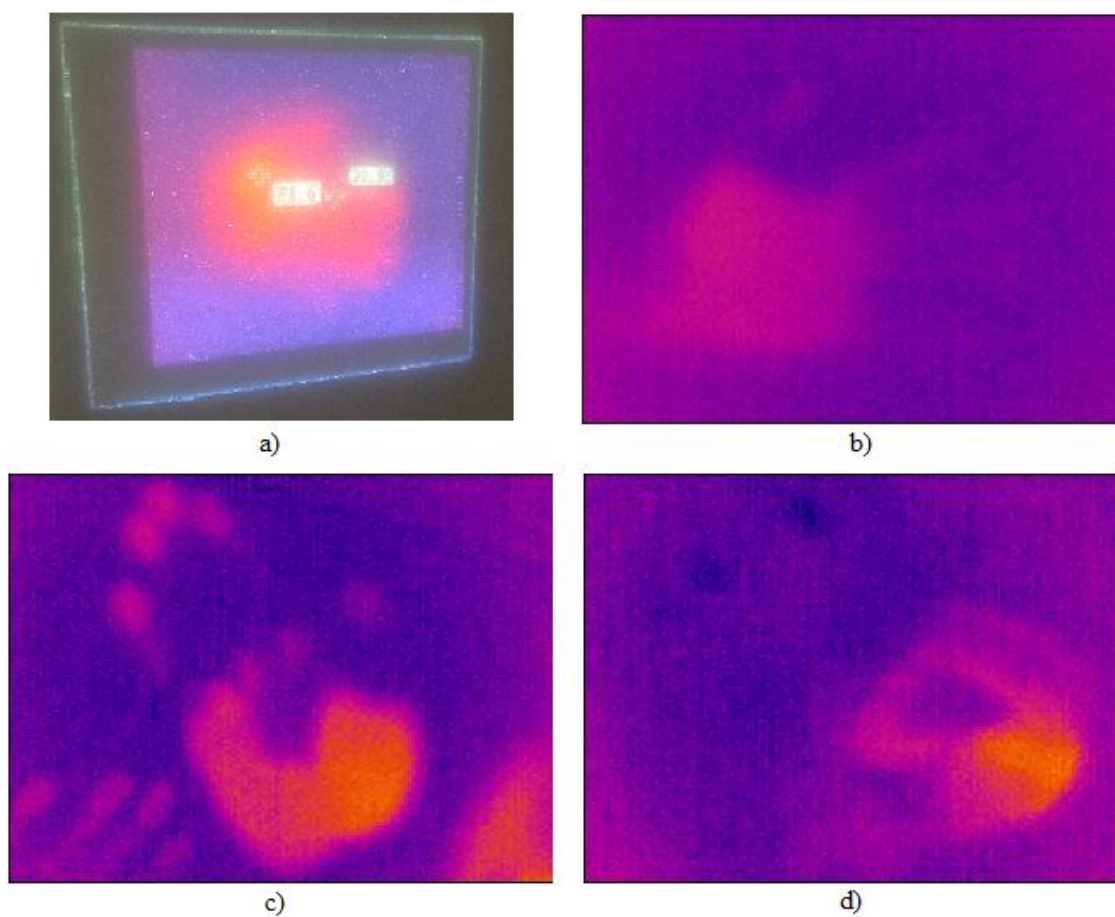
V zásadě mohou nastat dva stavy. Termokamera disponuje dynamicky upravovaným teplotním rozsahem v závislosti na měřeném objektu, ale také lze rozsah nastavit manuálně. Pro přesné měření je potřeba pevně nastavit rozsah a stejné hodnoty přiřadit i v uživatelském rozhraní aplikaci. Tím je zamezeno změně teploty pro barevné spektrum v termogramu. Takto bylo i zamýšleno měření v práci, ale při realizaci se ukázalo, že manuální rozsah sice zamezí změně teplotního rozsahu, ale barevné spektrum v termogramu již neodpovídá. Dochází v případě zvýšení/snížení teplot i k překročení nastaveného rozsahu. Dokonce se s takto nastaveným měřením dosahují horší výsledky, než při zanechání automatického módu. Rozsah je neustále upravován, ale po vložení měřeného objektu pouze v rozmezí cca jednotek °C, přičemž barevné spektrum zcela odpovídá paletové stupnici s přiřazeným teplotním rozsahem.

Z daného vyplývá, že provedená měření jsou spíše informativního charakteru vypovídající o změně a pohybu teploty, než o přesnosti. Práce původně nepočítala s nepřímým přístupem k teplotním informacím a byla o tento aspekt komplikována. V případě využití termokamery s přístupnými teplotními informacemi lze aplikaci použít i pro přesná měření.

7.1 Tepelné otisky

Tepelnými otisky se rozumí zanechání objektem tepelné stopy na podkladovém materiálu i po jeho odejmutí. Pokud podkladová plocha dobře vede, respektive přijímá teplo, může docházet k ovlivnění měření i samotného vizuálního promítání rozložení

teplot. Přenášené teplo ovlivní podkladovou plochu a šíří se ve všech směrech i mimo kontaktní místo s měřeným objektem, což zkreslí i barevné rozložení ve scéně. Při měření je třeba si dopředeně promyslet, jakého typu měření bude a tomu přizpůsobit scénu. Podkladová plocha není ve scéně potřebná, tím se vyhne i danému zkreslení. V případě vytvoření kalibrační roviny v prostoru, je potřeba ohlídat její umístění a dodržet ji.



Obr. 38: Tepelné otisky

Tepelné otisky na různých podkladových plochách jsou znázorněny na obr. 38. A) *Navržená plocha* otisk po 3 minutovém měření ruky, pot na dlani zvyšuje výraznost (teplotu) otisku. Následné tři obrázky b) *Navržená plocha z pěnového materiálu*, c) *Lakovaná dýha* a d) *Dřevo* byla měřena výraznost tepelného otisku po době 30 sekund. Z naměřených dat lze vidět u navrženého materiálu nejmenší tepelná stopa. Materiály z kovu zde nejsou ani prezentovány pro jejich vysokou tepelnou vodivost. Tepelná stopa bude zřetelná na každém povrchu, důležité je spíše její rozptýlení po povrchu po dlouhodobém měření.

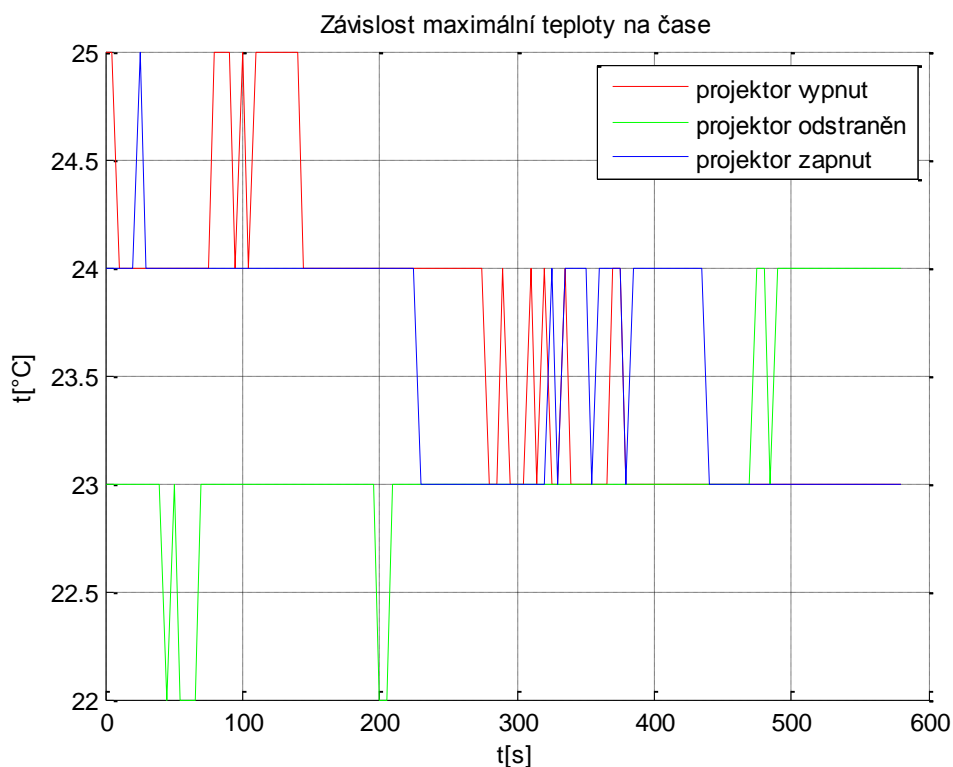
7.2 Vliv projekčního zařízení na měřený objekt – scénu

Celkově byly provedeny tři měření, 1) *s odstraněným projektorem*, 2) *s projektorem vypnutým*, ale stále sálající teplo, 3) *projektor zapnut*. Každé měření trvalo 10 minut se vzorkovací periodou 5s a obsahovalo údaj o maximální, minimální a průměrné hodnotě. Projektor má na levé straně větrání, kterým dochází k značnému oteplení okolí, proto byla během všech měření termokamera umístěna na opačnou stranu a provedeno vyhodnocení vlivu projekčního zařízení.

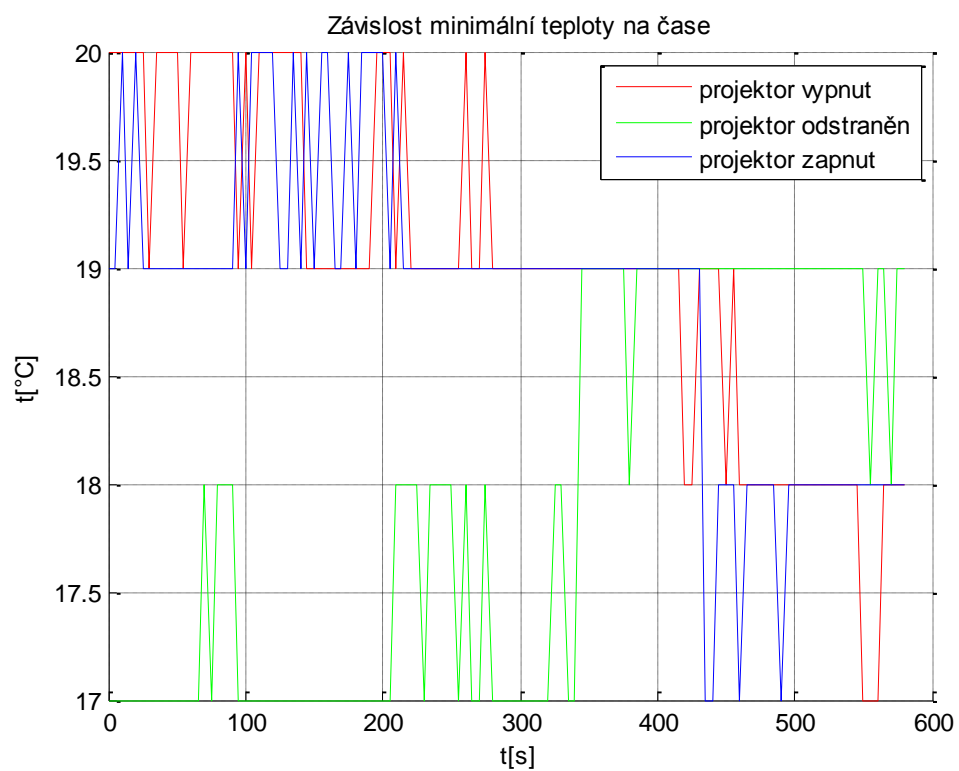
Projektor	$t_{\text{okolí}}$ počátek	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{okolí}}$ 5 minut	$^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{okolí}}$ 10 minut	$^{\circ}\text{C}$
zapnut	28,3		27,1		27,2	
vypnut	28,1		27,1		27,5	
odstraněn	27,0		27,7		27,9	

Tab. 1: Teplota okolí během měření

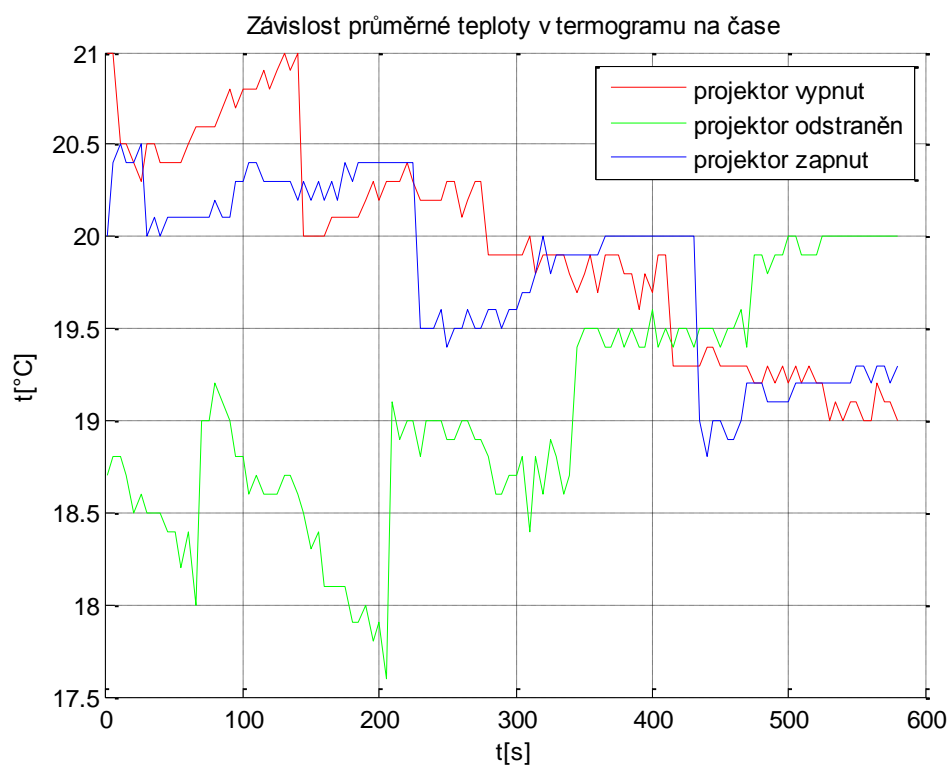
Teplota okolí byla měřena digitálním teploměrem celkem ve třech časových intervalech, na počátku měření, v polovině měření a na samotném závěru. Měření okolní teploty bylo provedeno ve značné vzdálenosti od probíhaného měření, aby se zamezilo ovlivnění sálajícím teplem projektoru.



Obr. 39: Závislost maximální teploty na čase



Obr. 40: Závislost minimální teploty na čase



Obr. 41: Závislost průměrné teploty na čase

Teplotní informace o maximu a minimu je přepočítávána na celé stupně z důvodu minimalizace náročnosti na výkon (využita optimalizovaná funkce z openCV knihovny k matematickým výpočtům v obraze). Jak již bylo řečeno s termokamerou dávající přímo teplotní informace by měření bylo provedeno s daleko větší přesností, vyčítání teplotních informací z obrazu je komplikace degradující prováděná měření.

Termokamera měla pevně nastavený rozsah, a tím se měření stává pouze informativním, jak bylo popsáno v kapitole 7 Analýza dat. Měřená teplota neodpovídá reálné teplotě, ale její průběh (změny) je naprosto korespondující s reálnou teplotou. Analýza vlivu okolních prvků je tedy nezkreslená.

Projektor je umístěn ve vzdálenosti okolo 1,5m od měřené scény, intenzita vyzářeného tepla projektorem klesá se čtvercem vzdálenosti. Z důvodu nestálých okolních podmínek nelze zcela prokázat, zda projektor má vliv na provedené měření. Teplota okolí byla značně proměnlivá, jak je vystiženo v Tab. 1. Pokud se porovná vývin měření s teplotou okolí v jednotlivých časech, lze konstatovat, že pokud vliv má, tak je pro přesnost našeho měření minimální.

7.3 Realizovaná měření scény se zpětnou projekcí

Provedená měření měla za úkol otestovat celkovou funkčnost navrženého systému s realizovanou aplikací a odhalit případné nedostatky, jak v aplikaci, tak vlivů omezujících měření. Důraz se kladl na:

- 1) Průběh kalibrace termokamery a projektoru, zda dochází ke korektnímu mapování bodů z termogramu na body ve scéně.
- 2) Možnosti práce v reálném čase, případně délky odezvy systému na změnu polohy tělesa ve scéně
- 3) Samotné odladění všech funkcí realizovaných v aplikaci
- 4) Korektnost vyčítaných teplotních informací z termogramu se skutečným rozložením teplot
- 5) Vliv projektoru na měření scény termokamerou

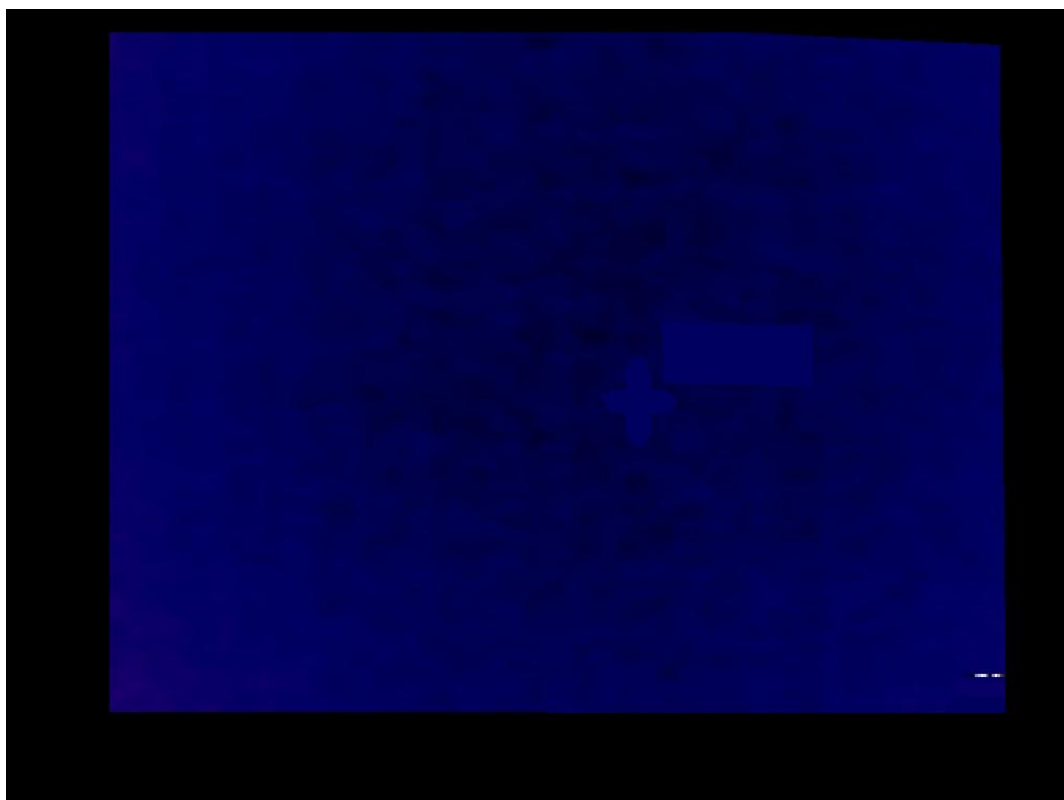
Co se týče prvních tří bodů, nebyly shledány žádné problémy. Práce v reálném čase je možná, ale pokud budou kombinovány funkce náročnější na strojový čas, dochází k době zpracování snímku okolo 300ms. Nicméně se nejedná o výrazné zpoždění způsobující degradaci prováděných měření.

Korektnost vypočtených teplotních informací z termogramu se skutečným teplotním rozložením ve scéně značně selhává. Měření se proto stává pouze informativním. Nesená informace o teplotě sice neodpovídá skutečné, ale průběh teploty v čase je odpovídající. Měření typu vlivu určitého podnětu na měřený objekt může tedy proběhnout se správným vyhodnocením.

Měření teplotního vlivu projektoru na měření scény termokamerou bylo posléze uloženo do txt souboru. Uložení proběhlo pomocí funkce implementované v uživatelském rozhraní. Tyto data byla využita k vykreslení průběhů na obr. 39 – 41. Formát řazení v textovém souboru je následující (jedná se pouze o výňatek z měření pro ukázkou):

```
00:00:00 -> Max 24.0, Min 19.0, Avg 20.0
00:00:05 -> Max 24.0, Min 19.0, Avg 20.4
00:00:10 -> Max 24.0, Min 20.0, Avg 20.5
00:00:15 -> Max 24.0, Min 19.0, Avg 20.4
00:00:20 -> Max 24.0, Min 20.0, Avg 20.4
00:00:25 -> Max 25.0, Min 19.0, Avg 20.5
00:00:30 -> Max 25.0, Min 19.0, Avg 20.1
00:00:35 -> Max 24.0, Min 19.0, Avg 20.0
00:00:40 -> Max 24.0, Min 19.0, Avg 20.1
```

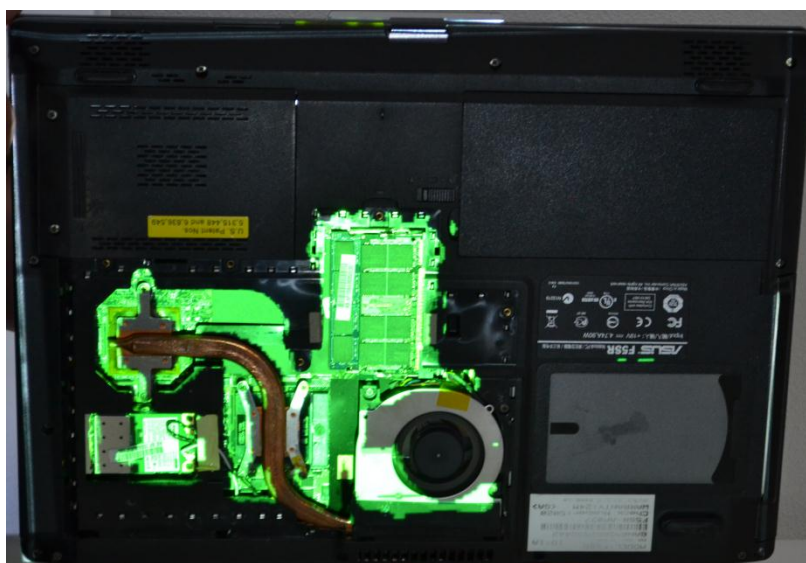
Vzorkovací perioda výčtu dat byla stanovena na 5s po dobu 10 minut. Každé provedené měření je označeno také časovým údajem, pro umožnění pozdější práce s daty. Měření proběhlo na scéně bez jakéhokoliv objektu k zamezení zkreslení. Obr. 42 zobrazuje pohled na scénu po využití funkce uložení promítané oblasti v uživatelském rozhraní.



Obr. 42: Měřená scéna uložena z GUI (měření vlivu projektoru)

Zvýraznění teplot nad zvolenou mezí + prolnutí s termogramem

Při zvýraznění teplot je implicitně nastavena mezní teplota 20°C. Pokud jsou ve scéně všechna místa teplejší, jak daná mez, bude celá scéna zvýrazněna. Uživatel si teplotní mez musí nastavit samostatně, není prováděno žádné průměrování scény k adaptivnímu přizpůsobení meze. Samostatné zvýraznění je viditelné na obr. 43, pokud je třeba promítnat i původní barevné rozložení termogramu, je zde možnost prolnutí se zvýrazněnými informacemi viz obr. 44.



Obr. 43: Zvýraznění teplot nad zadanou mezí



Obr. 44: Zvýraznění teplot nad mezní + smíšení, notebook bez podložky

Zvýraznění diferencí

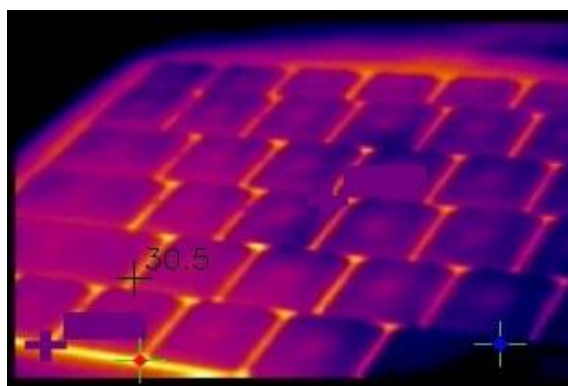
Diference znamená rozdíl, případně odchylka. V obraze se vyhledávají výrazné teplotní přechody, které jsou posléze zvýrazněny. Uživatel má možnost volby z 5 stupňů intenzit vyhledání. Jednotlivé stupně jsou značený level 1 – 5, přičemž level 5 vyhledává pouze nejvýraznější přechody, naopak level 1 i přechody hůře okem patrné. Při výběru funkce diferencí je implicitně nastaven stupeň level 4. Stejně jako u zvýraznění teplot nad zvolenou mezí i diference lze prolnout s původním termogramem.



Obr. 45: Zobrazení diferencí

Zobrazení teploty ve vybraném bodě

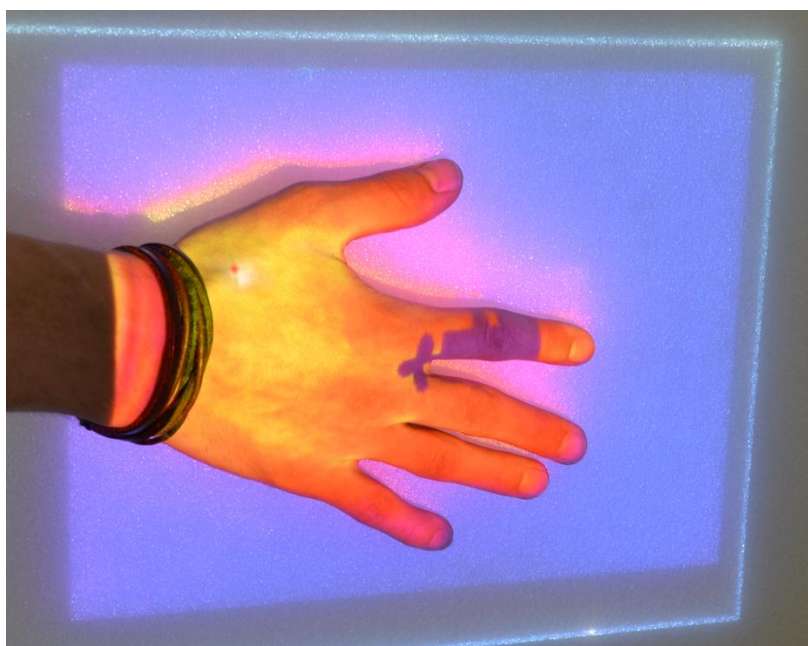
Uživatel má možnost přímo ve scéně označit ukazatelem myši bod jeho zájmu. V daném místě proběhne výpočet teploty s následným označením a výpisem teploty přímo ve scéně. Byla volena černá zobrazovací barva z důvodu lepší viditelnosti v reálných podmínkách. Zde na ukázkovém obraze se projevuje spíše opačně, hůře viditelně.



Obr. 46: Zobrazení teploty ve vybraném bodě

Zobrazení maxima a minima

Maximum značené červeným identifikátorem uprostřed kříže a minimum značené modrým identifikátorem uprostřed kříže, bývají ovlivněny teplotními značkami v termogramu. Pro ideální nalezení korektních oblastí je potřeba tyto značky prvně zamaskovat. Takový případ vystihuje obr. 47. Značky jsou zamaskovány barvou odpovídající pozadí, její hodnota je získána při kalibraci. Pokud k maskování nedojde, s největší pravděpodobností bude nalezeno maximum a minimum v jejich oblastech. Teplotní hodnoty vyznačených oblastí jsou uvedeny v uživatelském rozhraní.



Obr. 47: Zobrazení max/min v základním termogramu

8 ZÁVĚR

Práce se zabývá možnostmi využití termografie v praxi, analýzou a rozбором naměřených informací a realizací měřicího pracoviště se zpětnou projekcí analyzovaných informací z termovizní kamery do scény. Termografie v dnešní době zasahuje téměř do všech významných oborů. Nicméně vlastní využití práce je možné hledat převážně v oborech medicíny a výzkumu. V kapitole 2 jsou popsány principy a zásady vedoucí k minimalizaci chyby měření termovizní kamerou. Kapitola 3 popisuje základná názvosloví v termografii a její využití v obecné praxi a posléze i zaměřenou na tuto práci. Kapitola 4 a navazující kapitoly popisují návrh měřicího pracoviště, jeho využití, realizaci aplikace s uživatelským rozhraním, zpracování a analýzu naměřených dat.

Měřicí pracoviště je realizováno termokamerou značky GUIDE EasIR-4, projekčním zařízením (dataprotektor) a vhodně definovanou scénou. Termokamera umožňuje vyčítání teplotních informací v jednotlivých bodech termogramu, ale z důvodu nefunkčního ovladače muselo být přistoupeno k vyčítání dat přes analogový výstup termokamery. Tento aspekt značně zkomplikoval práci, neboť není přímo přístupováno k teplotním informacím, ale je potřeba tyto údaje vypočítat z grafického termogramu. Pro zjednodušení přepočtu byla vybrána pouze jedna možná paleta k měření a to paleta typu Iron. K zvolení palety Iron vedla její vhodná barevná interpretace, kdy minimální teplota odpovídá ve stupních šedi intenzitě 0 a maximální teplota intenzitě 255. Hodnoty mezi minimem a maximem mají lineární charakter, a tím je výrazně ulehčen přepočet na teplotní informaci. Další komplikací ve smyslu zpracování dat je výskyt teplotních značek a teplotní stupnice v obraze. Tyto údaje nelze vypnout, a je tedy potřeba jejich segmentace. Nicméně pod těmito prvky dochází ke ztrátě informace, protože jiný než grafický údaj o rozložení teplot není k dispozici.

Scéna je realizována z pěnového polystyrénu, který vykazuje dobré parametry vzpato k co nejmenšímu ovlivnění měřeného objektu. Rozbor scény s ohledem na tepelné otisky je proveden v kapitole 7 Analýza měření.

Samotný měřicí systém je potřeba vzájemně provázat neboli kalibrovat termokameru s projekčním zařízením. Ke kalibraci je realizována přenosná kalibrační deska s rozmístěnými 9 kalibračními body ve tvaru obdélníku. Kalibrační značky jsou reprezentovány výkonovými 1W led diodami. Led dioda disponuje kruhovou chladicí ploškou, která je dobře detekovatelná v termogramu po průchodu elektrického proudu, kterým je zahřáta na přibližnou teplotu 40°C. Ke kalibraci je potřeba detekovat značky i projekčním zařízením. To je realizováno pomocí uživatele, který označí jednotlivé značky pravým kliknutím myši. Výsledné body z termogramu a od projekčního zařízení jsou využity k výpočtu transformační matice převádějící obraz z roviny termokamery do roviny projektoru a posléze i k mapování bodů. Díky přenosné kalibrační ploše lze kalibrovanou rovinu vytvořit kdekoli i v prostoru, tím se také odstraní možné zkreslené

podkladovou plochou. Po kalibraci je vytvořena promítací oblast a lze realizovat měření se zpětnou projekcí teplotního rozložení na měřeném objektu.

K ovládání měřicího systému je vytvořeno uživatelské rozhraní pomocí knihovny MFC obsahující jednak prvky ovládací k reinicializaci termokamery, opětovné kalibraci, zastavení projekce, vypnutí projekce a znovu obnovení projekce. Posléze prvky grafické úpravy v podobě zobrazení diferencí, zvýraznění teplot nad zadanou mezí, zobrazení maxima/minima i s hodnotami, zobrazení teploty ve scéně dle označení uživatele a skrytí teplotních informací. Prvky měřicí maximální, minimální a průměrné teploty v termogramu. A v neposlední řadě prvky k uložení informací v podobě obrazce, videa nebo měřených dat. Uživatelské rozhraní má realizováno informační systém, který informuje uživatele, v jakém stádiu se aplikace nachází a posléze vypisuje i varovné hlášení při překročení nastavených teplotních limit.

Práce byla jako celek odzkoušena na několika typech měření. Měření s podkladovou plochou, bez plochy s kalibrovanou rovinou v prostoru a s různými objekty, převážně notebooku a části lidského těla. Výsledky měření, viz příloha. V neposlední řadě bylo provedeno měření vlivu projekčního zařízení na měřenou scénu. S přihlédnutím na silně proměnlivé okolní podmínky (změna teploty okolí) je vliv projekčního zařízení minimální. Provedené měření je spíše informačního charakteru, protože získaná data se mohou svou hodnotou rozcházet se skutečnou teplotní hodnotou z důvodu komplikovaného vyčítání teplotních informací. Hodnotově se sice data mohou rozcházet, ale změna teploty v závislosti na čase bude totožná pouze s určitým posunem. Daná problematika je rozebrána v kapitole 7 Analýza dat.

Možné pokračování práce je v otestování chování při využití termokamery s přístupnými teplotními informacemi. Veškerá měření by již nebyla pouze informačního charakteru, ale dosáhlo by se přesnosti odpovídající termokameře. Aplikace nevyžaduje ani velkou programovou úpravu, většina funkcí je uzpůsobených k práci přímo s teplotním údajem, docházelo by pouze k deaktivaci funkcí převádějící termogram na teplotní informace. Posléze by bylo velkou výhodou rozšířit možnosti zpracování naměřených dat ve smyslu RT tvorby grafu v GUI, možností vytvářet databázi termogramů k RT zpětnému srovnání v GUI, analýzou měřených dat v podobě histogramu a podobně. Práce může mít široké spektrum rozšíření počínaje grafickými úpravami termogramů až po samotnou analýzu získaných dat a její reprezentaci.

Literatura

- [1] GUIDE IR Analyser, User manual. China: 2009, s. 84
- [2] ŽÁRA, Jiří, BENEŠ, Bedřich, SOCHOR, Jiří, FELKEL, Petr. Moderní počítačová grafika, druhé, přepracované a rozšířené vydání. Brno: Computer Press, 2004. 609 s.
- [3] SONKA, Milan, HLAVAC, Vaclav, BOYLE, Roger. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, Third Edition. Toronto: Thomson learning, 2008, 829 s. ISBN: 10: 0-495-24438-4.
- [4] hw.cz: [online]. c1997-2009. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/infracervene-kvantove-detektory-termokamery-uvod>>
- [5] termowiky: [online]. c2010. Dostupný z WWW: <<http://termowiki.termogram.cz>>
- [6] QTEST, měřicí a přístrojová technika: [online]. c2011. Dostupný z WWW: <<http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>>
- [7] PHILIPS Lumileds Lighting Company. Technical Datasheet DS51, LUXEON K2. United States: 2008, 41 s. [online] Dostupný z WWW: <<http://www.luxeon.com>>
- [8] ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel. Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1999, 315 s. ISBN: 80-01-02057-6
- [9] ZEMBOL, F. Analýza parametrů infračerveného zobrazení, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Čech
- [10] ŠIMKO M. a kol. Aplikační možnosti termovize v praxi. Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, Slovensko: [online] Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26599>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Bolometry a Mmikrobolometry [online]. 2005. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART196-co-jsou-bolometry-a-mikrobolometry-.html>>.
- [12] VAVŘIČKA, Roman. Bezdotykové měření teploty. Praha, [2007]. [online] Dostupné z WWW: <<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>.
- [13] FLIR, 2012. www.flir.com. [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/content/?id=11430>>.

- [14] Automa: časopis pro automatizační techniku. 2012, [online]. Dostupné z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32519>.
- [15] KADLEC, K. Měřicí technika. Vysoká univerzita chemicko-technická v Praze. 2007. [online] Dostupné z WWW:
<http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/MT-INFOaRP10_Teplota_h.pdf>
- [16] tmvss spol s.r.o, Praha. www.tmvss.cz. [online] Dostupné z WWW:
<<http://www.tmvss.cz/Aplikace/Termovize/veda-a-vyvoj.html>>
- [17] MAREŠ, Luděk, Teplota a její měření. 2006. [online] Dostupné z WWW:
<<http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>>
- [18] commons.wikimedia. 2011. [online] Dostupné z WWW:
<<http://commons.wikimedia.org>>
- [19] CRIMINISI, A. and team, Plane Measuring Device. Department of Engineering Science, University of Oxford. United Kingdom. [online]1997. Dostupné z WWW:
<<http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/presentations/bmvc97/criminispaper/planedev.html>>
- [20] WHITAKER, Ross. Geometric transformation and image warping. SCI institute, School of Computing University of Utah. 2009.
- [21] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. Fyzik Fyzika část 2, Mechanika – Termodynamika, 5. vydání. Vysoké učení technické v Brně, VUTÍUM, PROMETHEUS. Brno, 1997, 576 s. ISBN: 80-214-1868-0

Seznam zkratek

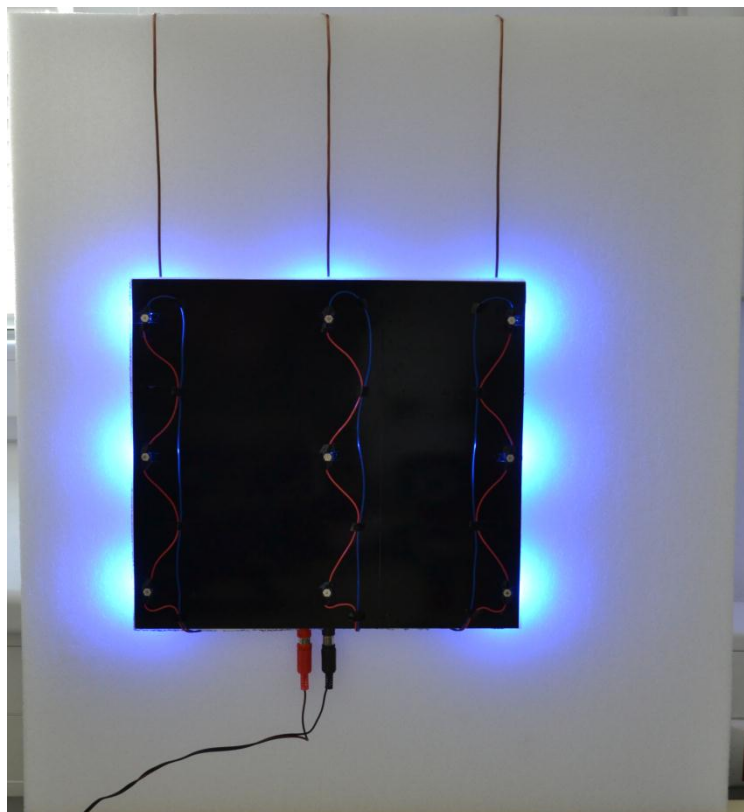
IR	InfraRed (infračervené záření)
USB	Universal Serial Bus (sériová sběrnice)
GUI	Graphical User Interface (uživatelské rozhraní)
DPS	Deska plošných spojů
HDD	Hard Disk Drive
CPU	Central Processing Unit (procesor)
RT (R-T)	Real Time (reálný čas)
PAL	Phase Alternating Line, standardní kódování analogového televizního signálu (vychází z NTSC)
NTSC	National Television System Committee, standard kódování analogového televizního signálu vzniklý v USA
FIFO	First Input First Output (fronta)
RGB	red, green, blue (barevný model)
CV	Computer vision (počítačové vidění)
MFC	Microsoft Foundation Class (knihovna k vytváření windows aplikací)
JPG	Joint Photographic Experts Group (ztrátová komprese pro ukládání obrázků)
AVI	Audio Video Interleave (multimediální souborový formát)
TXT	Text (textový soubor)

Seznam příloh

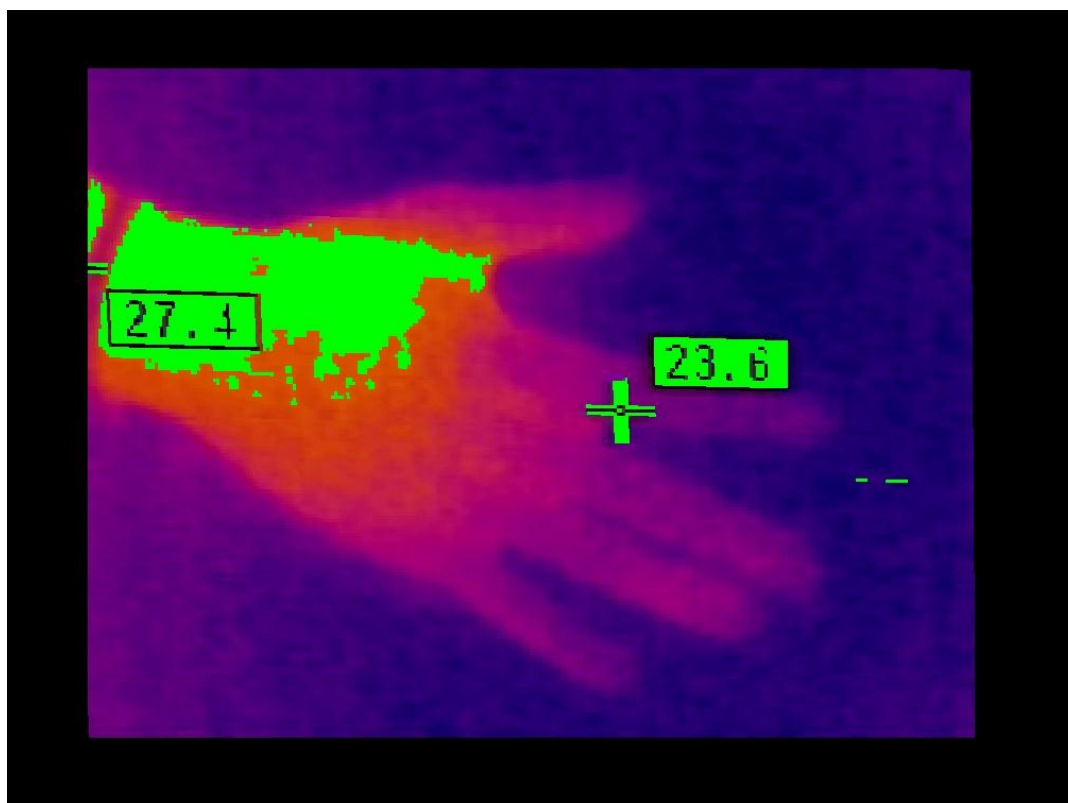
Příloha 1: Obrázková příloha s promítanými informací do scény

Příloha 2: Přiložené CD

- zdrojové kódy
- video ukázka
- elektronická podoba DP



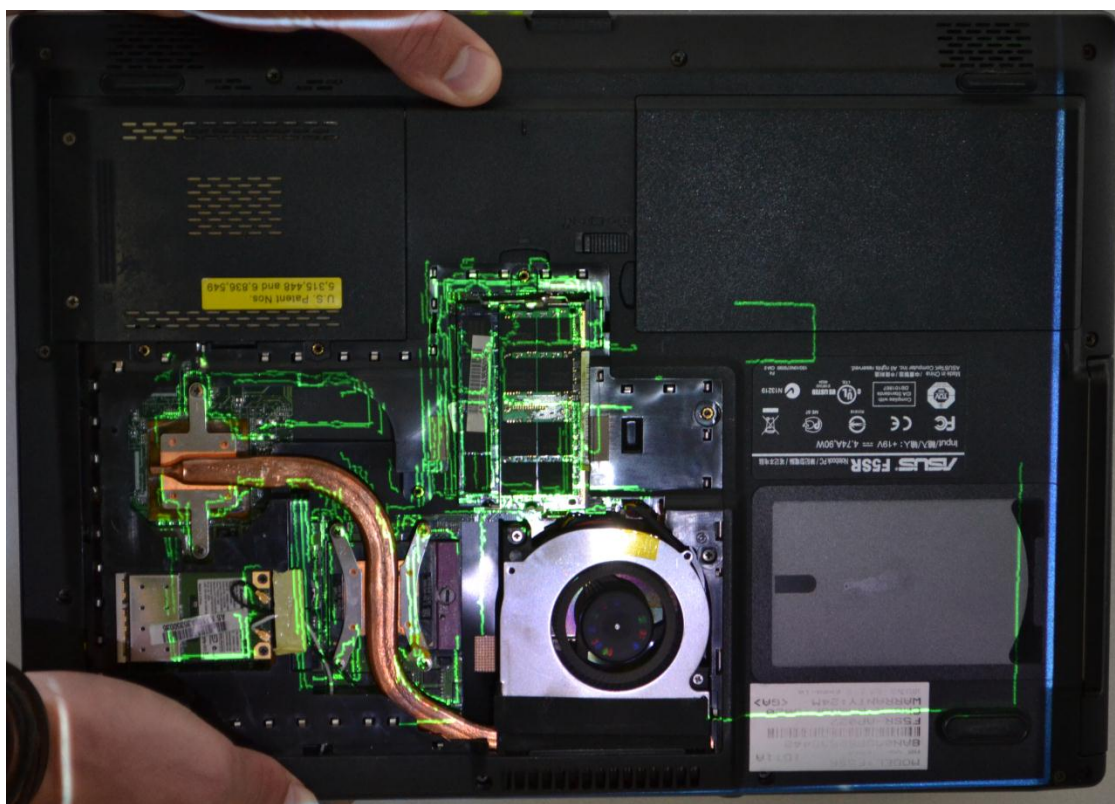
Obr. 48: Scéna s kalibrační deskou



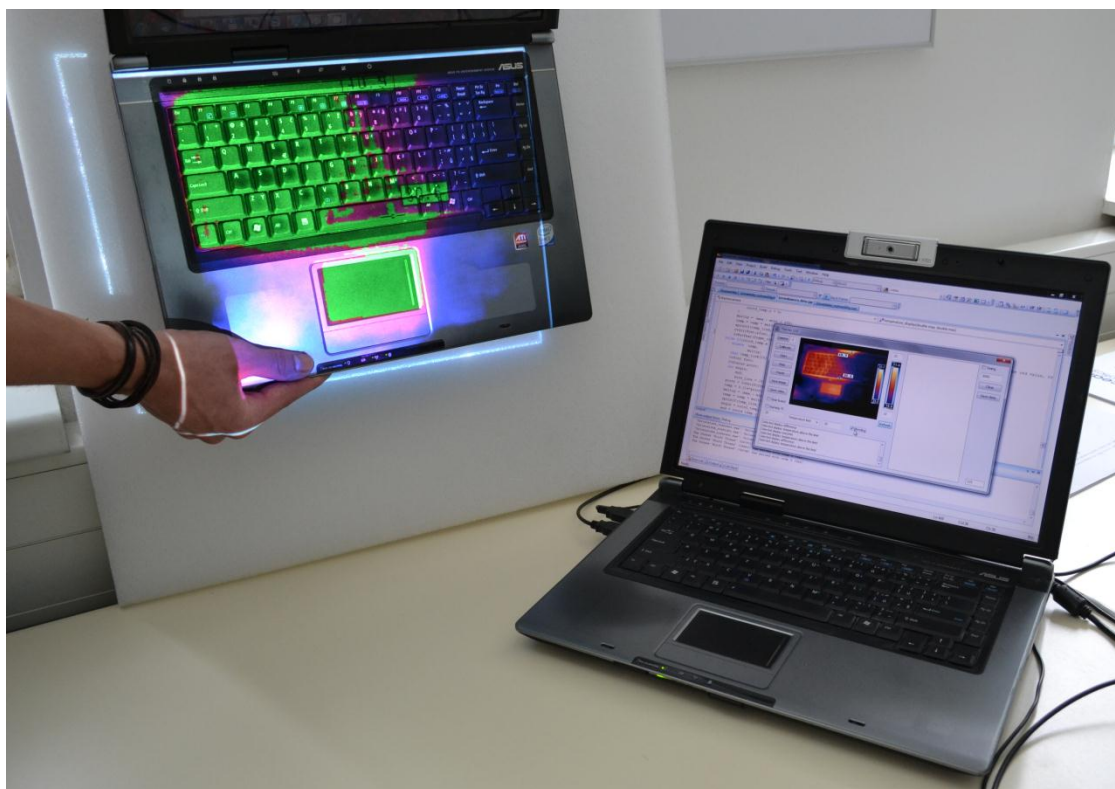
Obr. 49: Uložený snímek z GUI, ruka



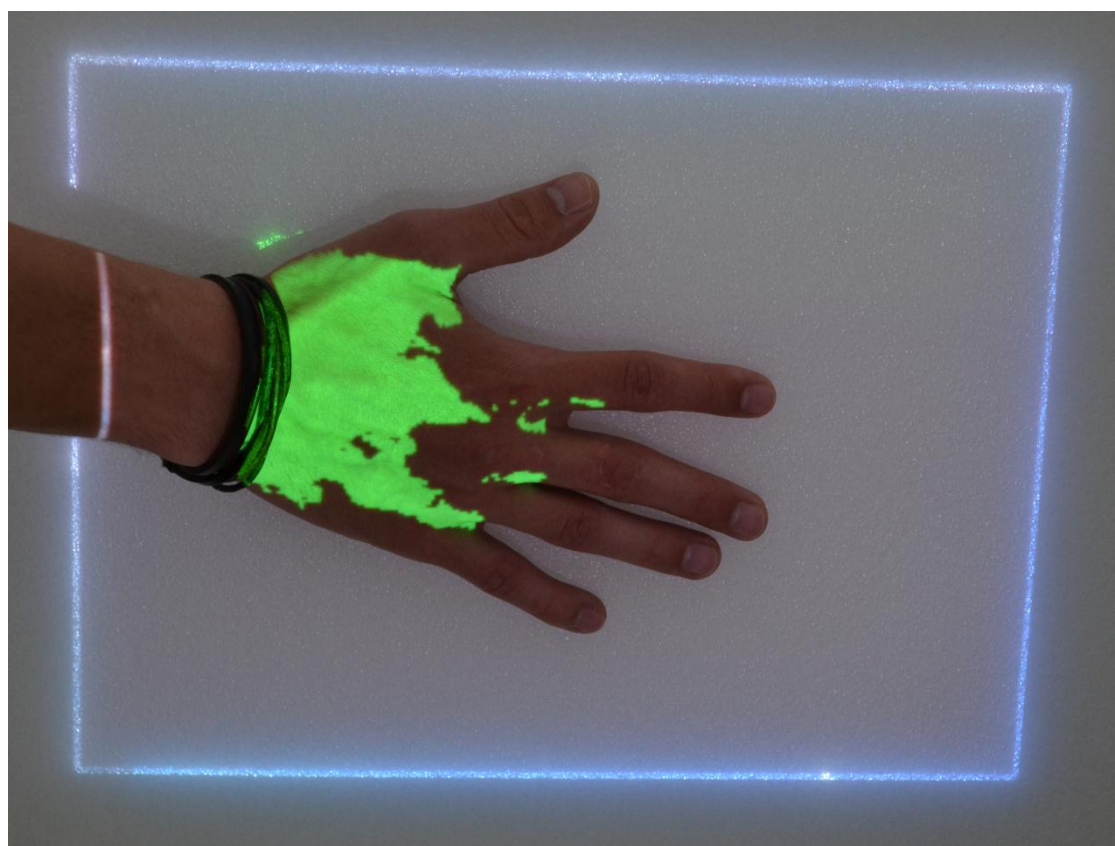
Obr. 50: Zvýraznění teplot nad mezí + GUI, notebook deska



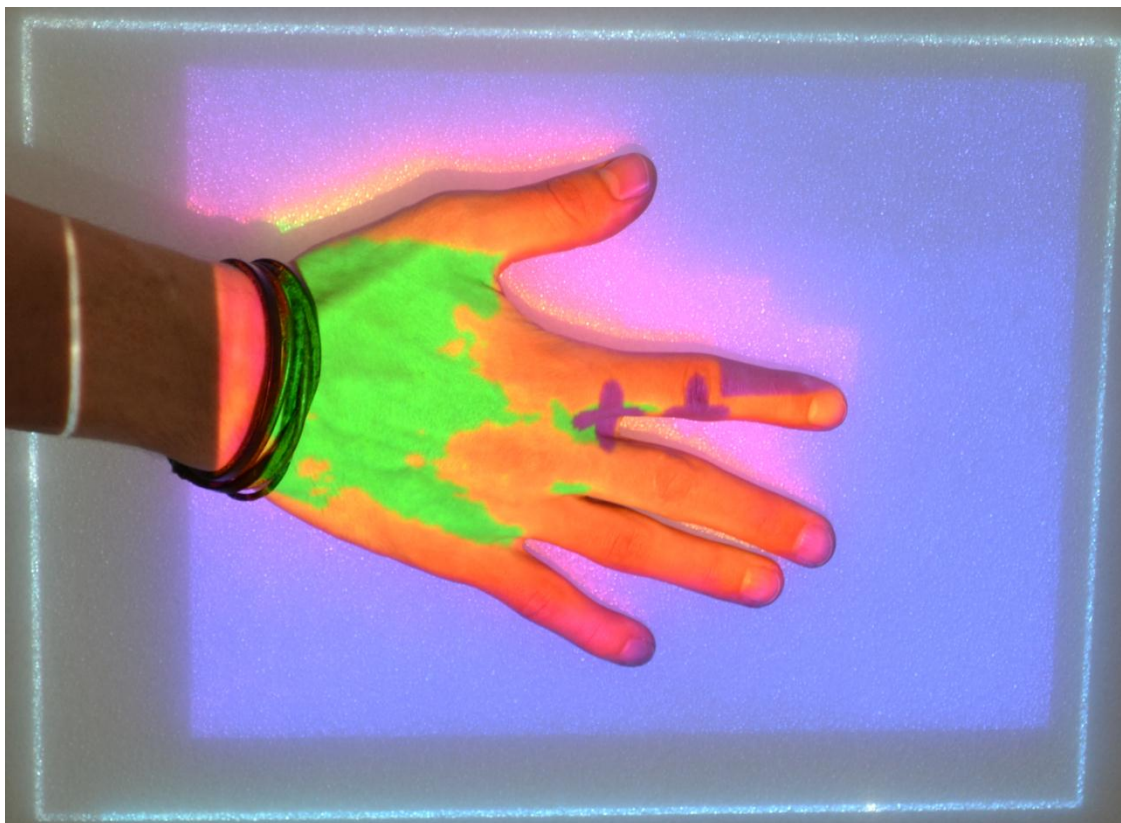
Obr. 51: Diference, notebook bez podložky



Obr. 52: Zvýraznění teplot nad mezí + smíšení + GUI, notebook klávesnice



Obr. 53: Zvýraznění teplot nad mezí + odstranění značek, ruka



Obr. 54: Zvýraznění teplot nad mezí + smíšení + odstranění značek, ruka